



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA HIDRÁULICA NO SISTEMA DE
ADUÇÃO DA CGH TAIPINHA**

Josiel Magri de Lima

Lajeado, 29 de junho 2020

Josiel Magri de Lima

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA HIDRÁULICA NO SISTEMA DE ADUÇÃO DA CGH TAIPINHA

Projeto de Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Dr. Gustavo Reisdörfer.

Lajeado, 29 de junho 2020

Josiel Magri de Lima

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA HIDRÁULICA NO SISTEMA DE ADUÇÃO DA CGH TAIPINHA

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Prof^ª. Dr. Gustavo Reisdörfer- Orientador
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Ma. Marcelo Luis Kronbauer
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Eng. José Luiz Scalco - Cerfox - Cooperativa de
Geração e Desenvolvimento Fontoura Xavier

Lajeado, 20 de julho de 2020

RESUMO

Resumo. A utilização de Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) vem com a finalidade de suprir à crescente demanda energética do país. Apresentam-se como uma alternativa ambiental e econômica para a geração de energia, visto que possuem características distintas das grandes e médias usinas hidrelétricas, pois não geram grandes áreas de alagamentos e não demandam complexa infraestrutura, além disto, possuem menor prazo de implantação e menores investimentos. Entretanto, evidencia-se que para um satisfatório funcionamento de uma CGH são imprescindíveis que todas as etapas previstas nos critérios de projeto e execução sejam rigorosamente cumpridas, a fim de evitar possíveis complicações de operação pois, qualquer falha técnica de dimensionamento acarreta grandes prejuízos de geração. Para compreender as recorrentes interrupções no processo de geração de energia, devido às constantes paradas para manutenção nos componentes da CGH Taipinha, buscou-se identificar as causas das excessivas patologias (fissuras nos condutos de carga e nas juntas de dilatação, rompimento das estruturas de sustentação dos condutos, quebra dos elementos das máquinas hidráulicas e oxidação interna dos condutos) apresentadas durante o tempo de operação da CGH, condições estas que vem causando queda significativa na produtividade da usina, e consequentemente, relevantes prejuízos financeiros. Para concretizar este estudo de caso foi necessário realizar levantamento a campo, onde extraiu-se dados e características estruturais dos elementos hidráulicos, que foram usados na comparação com os resultados dos cálculos de dimensionamento, baseados em modelos matemáticos. Disto, resultou na identificação de fenômenos hidráulicos, que produzem efeitos fora de uma faixa de segurança, que é o caso da cavitação, choque sônico e o golpe de aríete. Portanto, chega-se a resultados de dimensionamento que diferem das dimensões existentes, que é o caso do diâmetro do tubo de aeração, posicionamento da chaminé de equilíbrio, comprimento do conduto forçado, e dados de sobrepressão maior que o recomendado. A principal causa de efeito nas operações hidráulicas identificou-se como o tempo de fechamento da válvula que, conforme histórico de operação, a CGH operou com tempo de 6 s durante longo período, o que produzia efeitos danosos às estruturas e tubulações. Como recomendação, baseado nos resultados observados, sugere-se que tempo de fechamento mantenha-se em 10 s, para preservar as estruturas e tubulações.

Palavras-chave: CGH, Análise, Conduto de carga. Fenômenos hidráulicos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.2 Objetivos Geral	10
1.3 Objetivo Específicos	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Histórico da Geração de Energia Hidrelétrica	11
2.2 Capacidade de Geração do Brasil	12
2.3 Matriz Energética do Brasil	13
2.4 Energia Hidrelétrica	14
2.5 Pequenas Centrais Hidrelétricas e Central Geradora Hidráulica	15
2.6 Classificação de uma CGH	16
2.7 Funcionamento de uma CGH	17
2.8 Quanto à capacidade de regularização	18
2.8.1 Fio d'água	18
2.8.2 De acumulação	19
2.9 Tipos de arranjo hidroelétrico	20
2.10 Barragens	22
2.10.1 Barragem de Terra	22
2.10.2 Barragem de Enrocamento	22
2.10.3 Barragem de Concreto	23
2.11 Vertedouro	23
2.11.1 Escada de dissipação	24
2.11.2 Canal extravasor	24
2.12 Estrutura da tomada d'água	25
2.12.1 Limpa Grade	26
2.12.2 Comporta	26
2.13 Tubo de Aeração	27
	4

2.14 Desarenador	27
2.15 Sistema de Adução	29
2.15.1 Canal de adução	29
2.15.2 Tubulação de baixa pressão	30
2.15.2.1 Espessura mínima da tubulação	30
2.15.2.2 Diâmetro mínimo da tubulação de baixa pressão	31
2.16 Blocos de apoio ou selas para tubulação de baixa pressão	31
2.17 Blocos de ancoragem para conduto de alta pressão	33
2.18 Chaminé de Equilíbrio	34
2.19 Tubulação forçada ou de alta pressão	35
2.19.1 Espessura do Conduto Forçado	36
2.19.2 Diâmetro Econômico	37
2.19.3 Variação de pressão no conduto forçado	38
2.19.4 Transiente Hidráulico – Golpe de aríete	38
2.19.5 Perdas de carga no conduto forçado	39
2.19.5.1 Perda de carga por atrito no tubo	39
2.19.5.2 Perda de carga na entrada da tubulação	39
2.19.5.3 Perda de carga em expansão da tubulação	40
2.19.5.4 Perda de carga em curvas da tubulação	40
2.19.5.5 Perda de carga por redução da seção	41
2.19.6 Sobrepressão interna do conduto	41
2.19.7 Pressão externa do conduto	41
2.20 Linha de carga e linha piezométrica	42
2.21 Vibrações no conduto forçado	42
2.22 Tempo crítico de fechamento	43
2.23 Cavitação	43
2.24 Juntas de Dilatação	45
2.25 Outras instalações das CGHs	47
2.25.1 Casa de Força	47
2.25.2 Turbinas Hidráulicas	47
2.25.2.1 Turbina Kaplan	48
2.25.2.2 Turbina Francis	48
2.25.2.3 Turbina Pelton	48
2.25.2.4 Turbina Bulbo	48
2.26 Comportas - Válvula de segurança a jusante da tomada d'água	49
2.27 Gerador Elétrico	49
2.28 Canal de fuga e bacia de dissipação a jusante	50
2.29 Transformadores elevadores	50
2.30 Subestação	50

3 METODOLOGIA

51

3.1	Área de estudo	51
3.2	Levantamento das informações de geração de energia	54
3.3	Dimensionamento	54
3.3.1	Avaliação e dimensionamento da Tomada D'água	54
3.3.2	Dimensionamento do Conduto de Baixa Pressão	55
3.3.3	Dimensionamento da Chaminé de Equilíbrio	56
3.3.4	Dimensionamento do Conduto Forçado	59
3.4	Variação de Pressão - Golpe de Aríete	61
3.4.1	Espessura do Conduto Forçado	65
3.4.2	Avaliação da espessura em relação à pressão externa	66
3.4.3	Avaliação do tempo crítico de fechamento	66
3.5	Dimensionamento do Tubo de Aeração	67
3.6	Blocos de apoio (selas) para condutos de baixa pressão	67
3.7	Blocos de apoio (selas) para condutos de alta pressão	68
3.8	Blocos de ancoragem	69
3.9	Avaliação do comportamento hidráulico	71
3.10	Determinação das perdas de carga	71
4.	RESULTADOS	75
4.1	Descrição da Área de Estudos	75
4.1.1	Reservatório/Tomada d'água	75
4.1.2	Barragem - Escada de dissipação	76
4.1.3	Válvula de fechamento de barragem	76
4.1.4	Conduto de baixa pressão	76
4.1.5	Chaminé de Equilíbrio	78
4.1.6	Conduto de alta pressão	79
4.1.7	Juntas de Dilatação	79
4.1.8	Blocos de Apoio	80
4.1.9	Blocos de Ancoragem	81
4.2	Casa de máquinas	82
4.2.1	Conjunto turbinas/gerador	82
4.2.2	Painel de controle e automação	83
4.2.3	Canal de fuga	83
4.2.4	Subestação -Transformador de tensão	84
4.3	Levantamento das informações de geração de energia	84
4.4	Dimensionamento	88
4.4.1	Avaliação e dimensionamento do conduto de baixa de pressão	88
4.4.2	Dimensionamento do tubo de aeração	90
4.4.3	Dimensionamento da chaminé de equilíbrio	90
4.4.4	Dimensionamento do conduto alta pressão	92
4.4.5	Perdas de Carga	94
		6

4.4.6	Variação de Pressão - Golpe de Aríete	95
4.4.7	Blocos de apoio (selas)	97
4.4.8	Blocos de Ancoragem	98
APÊNDICES		105

1 INTRODUÇÃO

Para suprir as necessidades da vida moderna, a energia elétrica tornou-se um serviço essencial, por isso, deve ser eficiente, contínuo e prestado de forma adequada. Considerando os aspectos humanos, econômicos e sociais, a energia elétrica é reconhecida como um bem indispensável, que contribui, de maneira muito significativa, para a manutenção, desenvolvimento e bem-estar da sociedade, e que pode ser obtida de diversas formas, como: geração através de usina hidrelétrica, solar, nuclear, eólica, geotérmica, biomassa, entre outras.

Conforme a Organização das Nações Unidas (ONU), mais de um bilhão de pessoas ainda não tem acesso à energia elétrica no mundo, o que indica um aumento na busca por novas fontes de energia. O estudo ainda indica que a demanda energética nas próximas décadas pode ter um crescimento superior a 2% ao ano.

Neste contexto, as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) e as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) surgem como uma alternativa ambiental para a geração de energia limpa e renovável, minimizando os impactos ambientais produzidos pelas grandes Usinas Hidrelétricas (UHEs) e Usinas Termelétricas (UTES).

Conforme Ortiz (2014), as CGHs, PCHs e UHEs diferenciam-se basicamente pelo porte do empreendimento, onde as CGHs possuem potência instalada de até 1 MW, PCHs potência entre 1 MW e 30 MW e as UHEs possuem capacidade instalada superior a 30 MW. As CGHs apresentam-se como empreendimentos hidrelétricos de baixo impacto ambiental, pois, não geram grandes áreas de alagamentos e não demandam complexa infraestrutura e, podem localizar-se em lugares acessíveis sendo uma das alternativas para a crise energética a qual passa o Brasil. Nos últimos anos, o país tem sofrido com os constantes aumentos na

conta de energia, devido ao acionamento das termelétricas, em razão da escassez hídrica – baixo volume de água nos reservatórios.

Em destaque as CGHs apresentam grande potencial de crescimento na participação na matriz elétrica brasileira, tendo em vista, a possibilidade de serem instaladas em pequenos reservatórios, que estão espalhadas por todo território brasileiro e, em paralelo com dados que comprovam as necessidades no âmbito energético, estimulando os empreendedores e agentes políticos a voltarem seus olhos para esses aproveitamentos, considerando, que o retorno do investimento das CGHs é em curto prazo (ORTIZ, 2014).

Em função das características do empreendimento e dos elementos e máquinas hidráulicas envolvidas, é que o conhecimento e estudo da mecânica dos fluidos e hidráulica se faz importante, pois, o correto dimensionamento dos sistemas de adução de água impactam significativamente sobre a operação das centrais de geração de energia elétrica.

Assim, para um adequado funcionamento de uma CGH, todos os critérios de projeto devem ser atendidos, tendo em vista, que os empreendimentos hidrelétricos demandam significativos investimentos financeiros, e largo período para implantação devido aos processos de estudo, levantamento e aprovação dos projetos. Contudo, qualquer falha técnica de dimensionamento, acarreta grandes prejuízos de geração ao investidor, por isso, para um satisfatório funcionamento de uma CGH, são imprescindíveis que todas as etapas previstas nos critérios de projeto e execução sejam rigorosamente cumpridas, a fim de evitar possíveis complicações de operação.

A falta de regras definidas nas normas brasileiras em relação ao dimensionamento de estruturas para CGHs, e a complexidade do problema, levam à necessidade de estudos pontuais aplicados a situações específicas na análise do conjunto de adução e condutos forçados de um sistema de geração, intentando, que cada aproveitamento energético, demanda situações e características distintas.

Estudar-se-á neste trabalho, a CGH Taipinha, a qual localiza-se no município de Soledade, no Planalto Médio, região norte do Estado do Rio Grande do Sul. Está instalada no rio Lajeado Taipinha, afluente do Rio Fão, a uma altitude de aproximadamente 700 m do nível do mar. Sua operação iniciou-se em junho de 2011 e conta hoje (2020), com capacidade de geração de 1200 kVA instalado. Desde o início da operação, esta CGH vem apresentando, recorrentes paradas na geração de energia em função da necessidade de manutenções nas tubulações, bem como, de outros elementos estruturais os quais serão tratados neste trabalho.

Segundo Souza (1999), três quartos das patologias ou problemas operacionais de unidades de aproveitamento hidrelétrico são provenientes das instalações hidráulicas. Isso decorre pela falta de projetos hidráulicos e pela negligência com as execuções das instalações. Neste sentido, destaca-se a importância dos estudos das situações locais, pois, cada PCH possui suas características particulares, e analisá-las é importante.

Neste contexto, surge o objetivo deste trabalho, que pretende avaliar o dimensionamento do sistema de adução de água da CGH Taipinha, composto pelo conduto de baixa pressão, chaminé de equilíbrio e conduto forçado. Igualmente, relacionar o sistema de adução atualmente instalado, com os eventos observados, que ocasionam paradas na geração de energia. Diante disso, avaliar-se-á a influência hidráulica, comparando as características das tubulações instaladas com os resultados de dimensionados dos condutos, conforme referências adotadas para elaboração deste trabalho.

1.2 Objetivos Geral

Avaliar tecnicamente o sistema de adução da CGH Taipinha, através de redimensionamento do sistema de adução, chaminé de equilíbrio e conduto forçado, para verificar o atendimento das normas e padrões estabelecimentos para estes empreendimentos, bem como, a relação da situação atual com a ocorrência de paradas na geração de energia.

1.3 Objetivo Específicos

- Caracterizar a área de estudo - CGH Taipinha;
- Realizar levantamento da geração de energia, pretendida e realizada, da CGH entre 2012 e 2019;
- Avaliar e redimensionar o canal de baixa pressão, chaminé de equilíbrio e conduto forçado;
- Avaliar e redimensionar os blocos de apoio e ancoragem;
- Estudo do comportamento hidráulico dos condutos de carga e seus efeitos;
- Propor soluções técnicas de dimensionamento

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

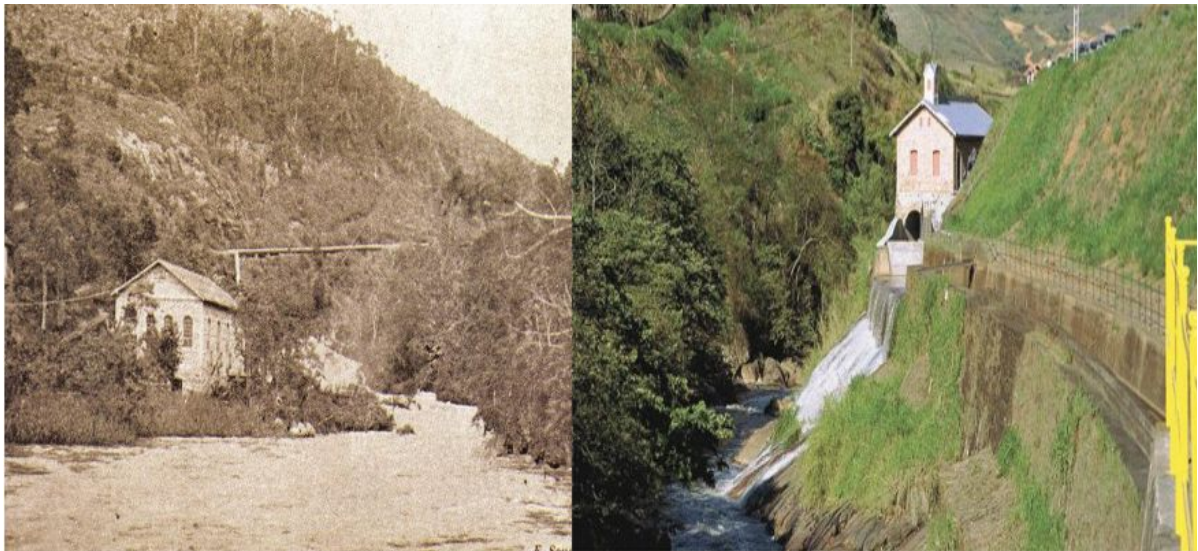
2.1 Histórico da Geração de Energia Hidrelétrica

A utilização da força das águas para gerar energia é um processo bastante antigo e iniciou-se com a utilização das chamadas “noras”, ou rodas d’água de perfil horizontal, que através da ação de uma queda d’água, geram energia mecânica muito utilizadas desde o século I A.C. A partir do século XVIII, com o surgimento de novas tecnologias como o motor, o dínamo, turbinas hidráulicas e a lâmpada, foram possíveis converter a energia mecânica em eletricidade (FARIA, 2008).

A Usina Hidrelétrica de Marmelos, inaugurada em Juiz de Fora, Minas Gerais, no ano de 1889, foi a primeira usina hidrelétrica da América do Sul. O empreendimento foi idealizado por Bernardo Mascarenhas (importante industrial de Juiz de Fora), fundador da Companhia Mineira de Eletricidade em 1888. Está localizada no Rio Paraibuna, às margens da Estrada União e Indústria, importante marco da engenharia no Brasil no século XIX. A Usina de Marmelos foi projetada para atender a indústrias local de tecidos e eletricidade para iluminação pública da cidade onde era alimentada a gás (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Em 1980 foi adquirida pela Companhia Energética de Minas Gerais, logo (1983), a Usina de Marmelos foi tombada pelo patrimônio municipal de Juiz de Fora e transformada em espaço cultural, onde foi instalado na edificação da usina o Museu de Marmelos Zero, que desde 2000 é administrado pela Universidade Federal de Juiz de Fora (CEMIG, 2019).

Figura 1- Usina Hidrelétrica de Marmelos – Museu de Marmelos Zero



Fonte: CEMIG (1989).

2.2 Capacidade de Geração do Brasil

Conforme o Banco de Informações de Geração (BIG), em 2019 o Brasil possuía, 7.440 empreendimentos de geração de energia em operação, contando com 164.751MW de potência instalada. A previsão para os próximos anos é de um aumento de 20.570MW na capacidade de geração nacional, oriundo dos 199 empreendimentos atualmente em construção, e 393 empreendimentos em fase de implantação ou para serem iniciados. Sendo que as CGHs participam com 0,4% da potência outorgada na Matriz Elétrica Brasileira, e as PCHs com 3,16%. Atualmente no país existem 700 CGHs em operação, com 716.982MW, e 425 PCHs, com 5.256.009 MW. Somente o Rio Grande do Sul possui 50 PCHs e 56 CGHs outorgadas (ANEEL, 2019).

Tabela 1- Capacidade de geração do Brasil por tipos de unidade geradora

Tipo		Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
Central Geradora Hidráulica	CGH	700	716.982	716.796	0,43
Central Geradora Undi-elétrica	CGU	1	50	50	0
Central Geradora Eólica	EOL	614	15.099.289	15.063.893	9,14
Pequena Central Hidrelétrica	PCH	425	5.256.009	5.213.936	3,16
Central Geradora Solar	UFV	2472	2.106.965	2.087.936	1,27
Usina Hidrelétrica	UHE	217	102.529.978	99.309.322	60,2
Usina Termelétrica	UTE	3006	41.968.12	40.417.692	24,5
Usina Termonuclear	UTN	2	1990000	1.990.000	1,21
Total		7.440	169.667.39	164.799.654	100

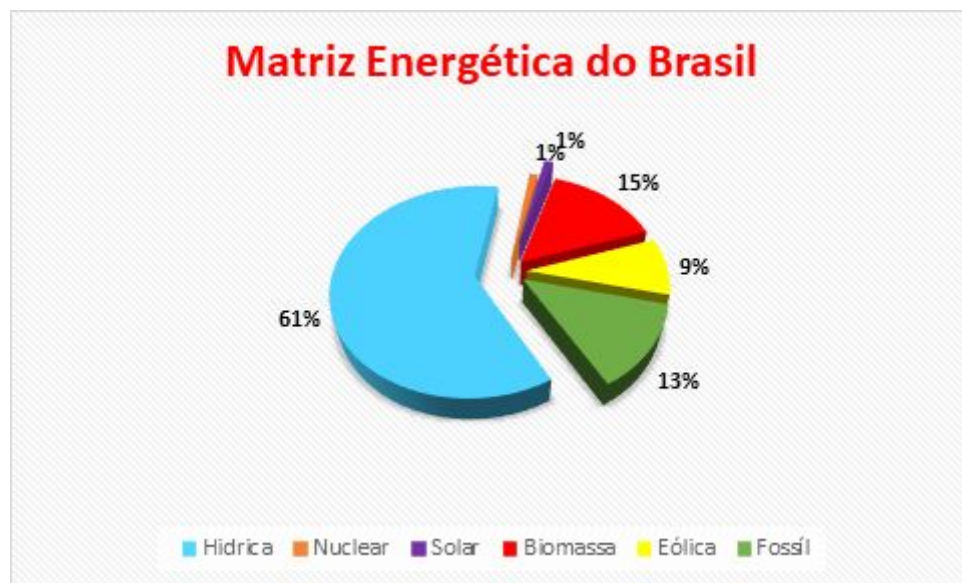
Fonte: ANEEL (2019).

2.3 Matriz Energética do Brasil

Matriz energética é um conjunto de fontes disponíveis de energia, que servem para suprir variadas demandas da sociedade.

No Brasil, a matriz energética mostra-se bastante diversificada, destacando-se por ser uma das mais renováveis do mundo. As fontes hídricas, representam 61% da oferta interna de energias renováveis produzidas no país, 15% de Biomassa (Biocombustíveis, Agroindustriais, Resíduos Sólidos Urbanos), 13% Fósseis (Carvão Mineral, Gás Natural, Petróleo), 9% Eólica (Vento), 1% Nuclear (Urânio), 1% Solar (Radiação Solar). A figura 2 representa a distribuição das fontes renováveis no Brasil (ANEEL, 2019).

Figura 2 - Índice de energia elétrica ofertada no País



Fonte: Balanço Energético Nacional (2018).

2.4 Energia Hidrelétrica

A energia hidrelétrica é obtida através da transformação de energia hidráulica ou energia hídrica em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica. É adquirida a partir da força de movimentação da massa das águas dos rios e lagos, aproveitada por meio de um desnível ou queda d'água, que é convertida na forma de energia, através de turbinas hidráulicas ou moinhos de água (ORTIZ, 2014).

Para caracterizar um arranjo de geração eletro hidráulica, adota-se um sistema que se permite controlar o nível da água de um reservatório através de um vertedouro. E através de canais, túneis ou condutos abertos ou metálicos a água represada, é captada e transportada até a casa de força, fazendo com que as turbinas hidráulicas acopladas a um eixo, que produz energia mecânica, quando conectado a um gerador é transformada em energia elétrica. Após movimentar as turbinas a água volta ao leito natural do rio pelo canal de fuga (SCHREIBER, 1977).

Figura 3 - Barragem Usina Hidrelétrica Binacional Itaipu



Fonte: Itaipu Binacional (2019)

2.5 Pequenas Centrais Hidrelétricas e Central Geradora Hidráulica

Conforme enquadramento da ANEEL, as geradoras de energia elétrica de pequeno porte podem ser classificadas em Pequena Central Hidrelétrica (PCH) e Central Geradora Hidráulica (CGH), as quais são caracterizadas pela sua capacidade, ou seja, pela potência instalada e o tamanho do seu reservatório. Conforme a Resolução nº 394/1998 da ANEEL: As CGHs (Centrais Geradoras Hidráulicas), classificam-se por ter até 1 MW de potência instalada, e as PCHs de 1 a 30 MW, com área de reservatório de até 03 Km², além da potência instalada, existem características ambientais que em seus processos de licenciamento, diferenciam-se das geradoras de energia.

As PCHs dependem de Estudos de Inventário, o qual irá analisar o potencial hidráulico do rio onde ela será instalada, e o projeto básico, que é um detalhamento técnico, que é analisado e aprovado pela ANEEL. Já em uma CGH, o processo de licenciamento é muito mais simples, uma vez que a elaboração do inventário e do projeto básico não são necessários, atentando-se apenas em comunicar ao órgão regulador e fiscalizador sobre a intenção de implantação, assim facilitando sua implantação. Outra importante diferenciação é quanto ao prazo de implantação, sendo que o prazo total para implantação de uma PCH é, em média, de cinco anos, para uma CGH é de dois anos e meio (ABRAPCH, 2019).

Portanto, para a construção das CGHs a burocracia é muito menor, quando comparadas com as demais de maior capacidade, neste tipo de empreendimento, há dispensa de concessão, permissão ou autorização, limitando-se somente em licenciamentos ambientais.

A geração de energia por meio de CGHs apresentam várias vantagens, trazendo ganhos sociais para população local, ambientais, econômicos e de segurança de abastecimento, já que é uma fonte renovável, com menor impacto ambiental para as gerações presente e futuras. De construção mais rápida, com geração distribuída e descentralizada, melhora a confiabilidade para o sistema elétrico da região onde está conectada, além da redução da emissão de gases de efeito estufa, já que substitui fontes térmicas fósseis. Geram impostos, renda e empregos diretos e indiretos, no local onde estão inseridas (ORTIZ, 2014).

Na sequência serão apresentadas as classificações, características e as principais partes constituintes das CGHs.

2.6 Classificação de uma CGH

Podem ser classificadas quanto à potência instalada e queda de projeto, conforme Tabela 2, quando haver confronto de parâmetros, uma vez que um ou outro isoladamente não permite uma classificação adequada. Para as CGHs com alta e média queda, que dispõem de um desnível natural elevado, caso a casa de força fique situada, afastada da estrutura do barramento, terá conseqüentemente que usar um canal ou conduto de baixa pressão com maior extensão. Para as centrais de baixa queda, todavia, a casa de força fica, normalmente, junto da barragem, sendo a adução feita através de uma tomada d'água acoplado ao barramento (ELETROBRAS, 2000).

Tabela 2 - Classificação quanto à potência e queda de projeto

Classificação das Centrais	Potência P(kW)	Queda de Projeto – H_d (m)		
		Baixa	Média	Alta
MICRO	$P < 100$	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
MINI	$100 < P < 1000$	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
PEQUENA	$1000 < P < 3\ 0000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

Fonte: Eletrobras (2000).

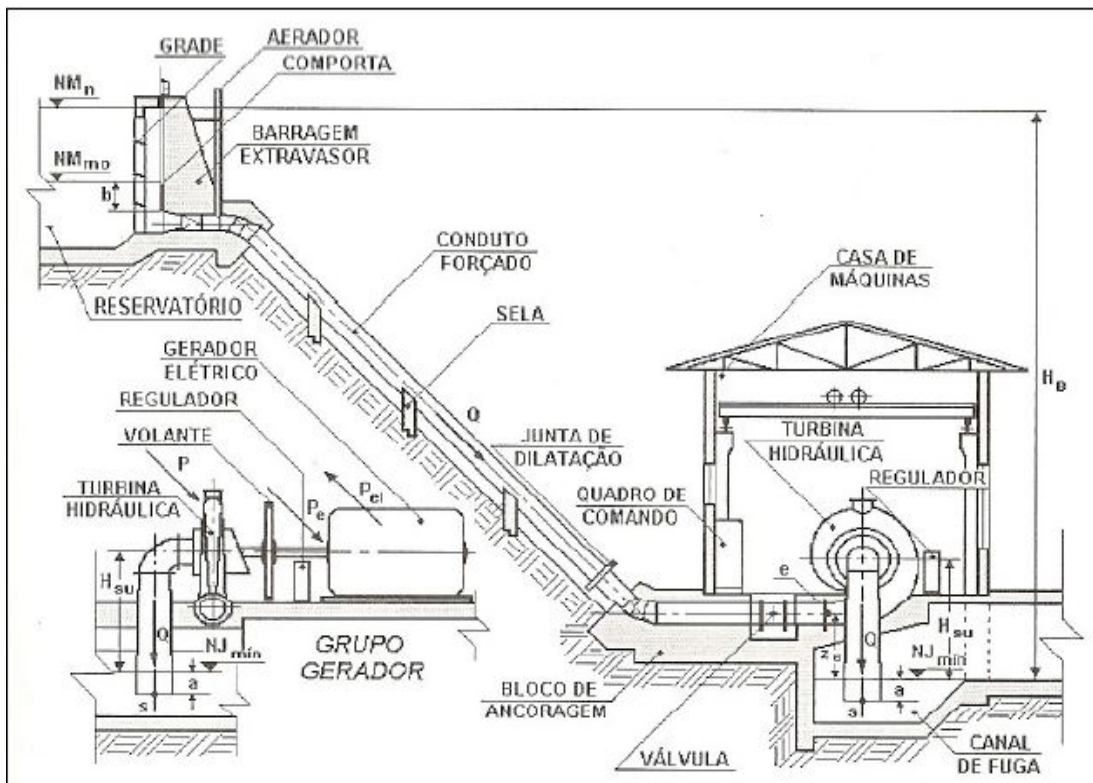
A legislação brasileira, recentemente trouxe mudanças no enquadramento das CGHs através da Lei nº 13.360/2016, a qual apresentou a conversão de prorrogação da concessão de

Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) por até 30 anos e o enquadramento como Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) para potenciais de geração de até 5 MW, simplificando o processo e alargando mais a faixa de enquadramento (ANEEL, 2017).

2.7 Funcionamento de uma CGH

Formada basicamente pelas mesmas estruturas que uma usina hidrelétrica, portanto, em menor escala, a CGH, tem como finalidade, utilizar as águas dos rios para produzir eletricidade, sendo enquadrada como geração de energia limpa e renovável de baixo impacto ambiental. É constituída por um sistema de captação e adução de água, com barragem, casa de força e vertedouro, que permite reprimir e controlar o nível da água do reservatório, além de captar e conduzir a mesma através de canais, túneis ou condutos metálicos até a casa de força, assim, a água canalizada chega a uma turbina, fazendo girar um rotor, que acoplado a um gerador produz eletricidade, que posteriormente, é transmitido para distribuidora, que entregará ao consumidor. Ao final, toda a água utilizada no processo de geração de energia retorna ao rio através do canal de fuga, não havendo dessa forma perdas (ORTIZ, 2014).

Figura 4 - Modelo esquemático de uma CGH



Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

A energia produzida pelas hidrelétricas é direcionada para o Sistema Interligado Nacional (SIN) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que decide o destino da energia gerada de forma a atender as demandas nacionais, por fim, chegando ao consumidor final, residências, fábricas e escolas etc. Conforme estudo, 1 MW de energia pode abastecer aproximadamente 1.000 famílias (ANEEL, 2019).

Conforme estudo da Eletrobras (2000), para se ter um arranjo para aproveitamento hidrelétrico é necessário levantamentos topográficos, geológicos e geotécnicos, destacando-se as condicionantes ambientais do local, através de estudo e projeto básico, que consiste na definição do aproveitamento hidroelétrico, o qual, engloba vários ramos da engenharia, tais como: Hidráulica, Geologia, Mecânica dos Solos e das Rochas, Estática, Mecânica, Hidrologia, Arquitetura e Eletricidade, entre outros, demandando assim, maior capacidade técnica da equipe na elaboração dos projetos e execução destes empreendimentos. Evidencia-se, com isso, que o projeto de engenharia para aproveitamentos hidroenergéticos é um estudo complexo que envolve conhecimentos e trabalhos interdisciplinares.

2.8 Quanto à capacidade de regularização

Conforme Manual da Eletrobras (2000), são basicamente utilizados três tipos de reservatórios, que são definidos quanto a sua capacidade de regularização, sendo eles: fio d'água, acumulação com regularização diária e acumulação com regularização mensal, conforme definido a seguir.

2.8.1 Fio d'água

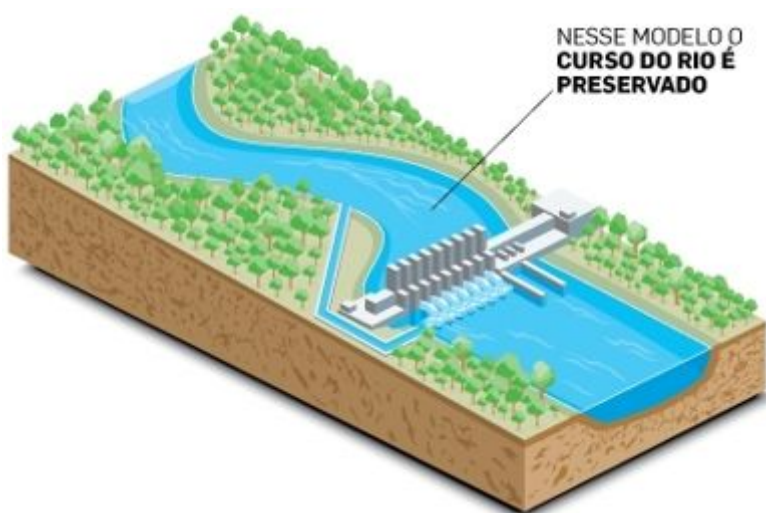
Usinas hidrelétricas “a fio d'água” são aquelas que não dispõem de reservatório de água, ou o têm em dimensões menores do que poderiam ter. Optar pela construção de uma usina “a fio d'água” significa optar por não manter um estoque de água que poderia ser acumulado em uma barragem (SOUZA, 1999).

Geralmente esse tipo de PCH é utilizado quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária para atender à demanda máxima e à potência instalada. No caso, descarta-se o volume do reservatório concedido pela barragem. O sistema de adução é projetado a fim de conduzir a descarga necessária para atender a potência de demanda máxima. Para o aproveitamento energético, que será parcial, o vertedouro

funcionará na quase totalidade do tempo extravasando o excesso de água. Para os projetos de PCH a fio d'água dispõem das seguintes simplificações: dispensam estudos de regularização de vazões, estudos de sazonalidade da carga elétrica do consumidor e facilita os estudos e a concepção da tomada d'água (ELETROBRAS, 1985).

Quando não há flutuações significativas do nível da água (NA) do reservatório, não é necessário que a tomada d'água seja projetada para atender a depleções do NA, da mesma forma, quando a adução primária é projetada através de canal aberto, a profundidade, deverá ser a menor possível, pois não haverá a necessidade de atender às depleções. Pelo mesmo motivo, no caso de haver necessidade de instalação de chaminé de equilíbrio, a sua altura será a menor possível, pois o valor da depleção do reservatório, no cálculo dessa altura, é desprezível. As barragens serão mais baixas, pois devem apenas desviar a água para o circuito de adução, pois as áreas inundadas são pequenas (ELETROBRAS, 2000).

Figura 5 - Ilustração Fio d'água

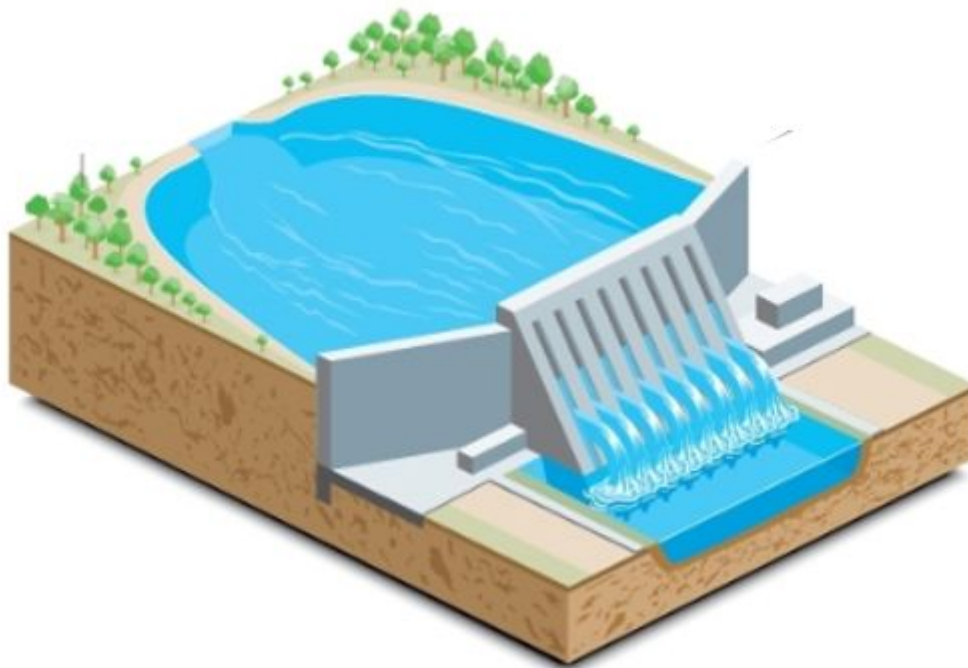


Fonte: Usina Baixo Iguaçu (2014).

2.8.2 De acumulação

São usinas com reservatório onde ocorre a regularização do rio, ou seja, durante os períodos de cheia, além do fluxo da água utilizada para a produção de energia, ocorre acúmulo de água no reservatório. Durante os períodos secos, a água acumulada, decorrente do fluxo natural, é utilizada para gerar energia. Por isso, usinas com reservatórios de regularização, têm como característica importante, o fato de que a produção de energia é mais constante e com fator de capacidade mais elevado (ELETROBRAS, 2000).

Figura 6 - Ilustração de Acumulação



Fonte: Usina Baixo Iguaçu (2014).

2.9 Tipos de arranjo hidroelétrico

Basicamente existem três tipos de arranjo de centrais hidrelétricas, a de represamento (CHR), desvio (CHD) e de derivação (CHV). A CHR, caracteriza-se por ser implantada em um trecho do rio e ter ligação direta entre a barragem e a casa de máquinas através do conduto forçado. Mais utilizadas em grandes centrais hidrelétricas. Já, a CHD, caracteriza-se por ser implantada utilizando um trecho do rio, relativamente grande, que por questões técnicas limitam-se o comprimento do conduto forçado, e impõem a necessidade de o nível da água de montante estar mais próximo de jusante, impondo entre a barragem e o conduto forçado a instalação de um sistema de baixa pressão. A CHV, são os arranjos em que o barramento é feito em um rio e a descarga em outro, este tipo também pode ser conjugado ao sistema de represamento e desvio, dependendo das condições topográficas do solo com o rio que escoar com diferentes cotas (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

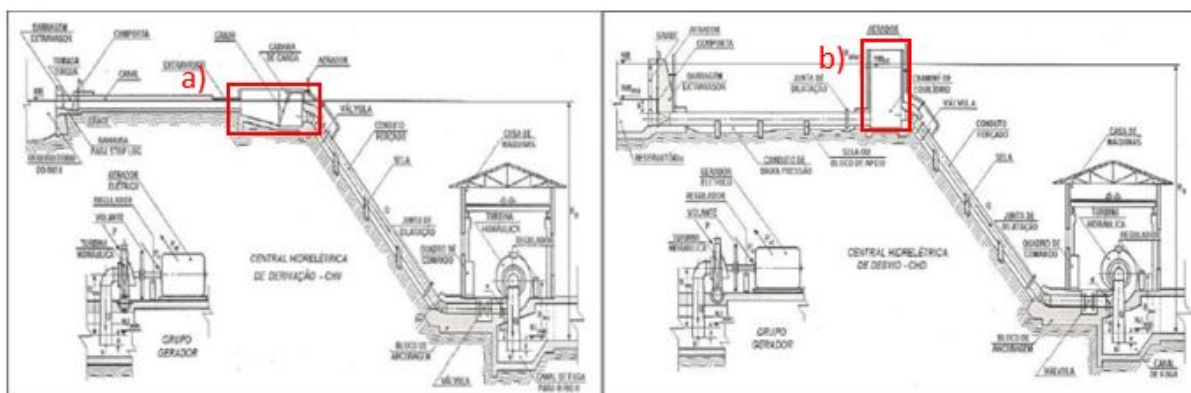
Atualmente, as usinas hidrelétricas de pequeno porte são classificadas em dois arranjos básicos, onde pode ser constituído por barragens, vertedouro, tomada d'água, canal de adução, câmara de carga, tubulação forçada, casa de máquinas e canal de fuga. Também pode ser substituída a câmara de carga por chaminé de equilíbrio. Após a delimitação dos principais

componentes de uma usina hidrelétrica de pequeno porte se faz necessário determinar quando utilizar câmara de carga ou chaminé de equilíbrio.

De acordo com Eletrobras (2000), a câmara de carga é a estrutura que está posicionada entre o canal de adução e a tomada d'água. O chaminé de equilíbrio é um reservatório de eixo vertical, que geralmente está posicionado no final da tubulação de adução de baixa pressão e a montante do conduto forçado, que possui como objetivo, amortecer as variações de pressão, que se propagam pelo conduto forçado (golpe de aríete), decorrente do fechamento rápido da turbina. Tem a função de armazenar água para fornecer ao conduto forçado a fim de manter o fluxo inicial provocado pela nova abertura da turbina, até que se estabeleça o regime contínuo.

É possível estabelecer a utilização de chaminé de equilíbrio através da relação entre o comprimento do conduto forçado (L_{cf}) e a queda bruta (H_b), caso for maior que cinco, é necessário sua utilização (ELETROBRAS, 2000).

Figura 07 - Corte esquemático com câmara de carga (a) e com chaminé de equilíbrio (b)



Fonte: Souza (1999).

Serão apresentadas as características técnicas das CGHs, considerando diferentes tipos de arranjos e abordando principalmente componentes estruturais, hidromecânicos e elétricos das centrais geradoras. Os componentes civis de uma central hidrelétrica são basicamente: barragem, sistema de adução (tomada d'água, canal, câmara de carga, chaminé de equilíbrio), extravasor, vertedouro e casa de força.

2.10 Barragens

São obras estruturais de engenharia que têm como objetivo reter a água do rio, o qual pode ser utilizado para geração de energia elétrica, irrigação, regulação para navegação, abastecimento de obra pública e industrial, mitigação de inundações entre outros. Podem ser feitas de concreto, contrafortes, enrocamento de terra ou mista (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Com a elevação do nível da água, possibilita a alimentação da tomada d'água, assim, permite-se moldar um reservatório que normalize a vazão d'água em um período de seca. Para os locais de baixa queda, a barragem tem a função de criar também um desnível para a produção da energia pretendida. Portanto, para o dimensionamento das barragens são necessários atender os critérios de projeto, que são definidos no arranjo dos tipos de estruturas que serão utilizados, e são escolhidos em função das características topográficas, geológicas, geotécnicas e pluviométricas da região, considerando-se, ainda, a disponibilidade e logística dos materiais de construção e o processo construtivo a ser utilizado (ELETROBRAS, 2000).

Nos projetos de aproveitamento hidrelétricos, utilizam-se de diferentes tipos de barragem, quais sejam:

2.10.1 Barragem de Terra

Quando construída com terra compacta, possuindo geralmente, um núcleo de material impermeável com um filtro de drenagem a jusante. Estas barragens possuem seções transversais trapezoidais, sendo seus parâmetros recobertos por revestimento protetor que normalmente, é de pedra ou grama. Neste tipo de barragem a água não deve passar sobre sua crista devido ao risco de erosão, motivo pelo qual são ditas barragens não galgáveis (SOUZA, 1999).

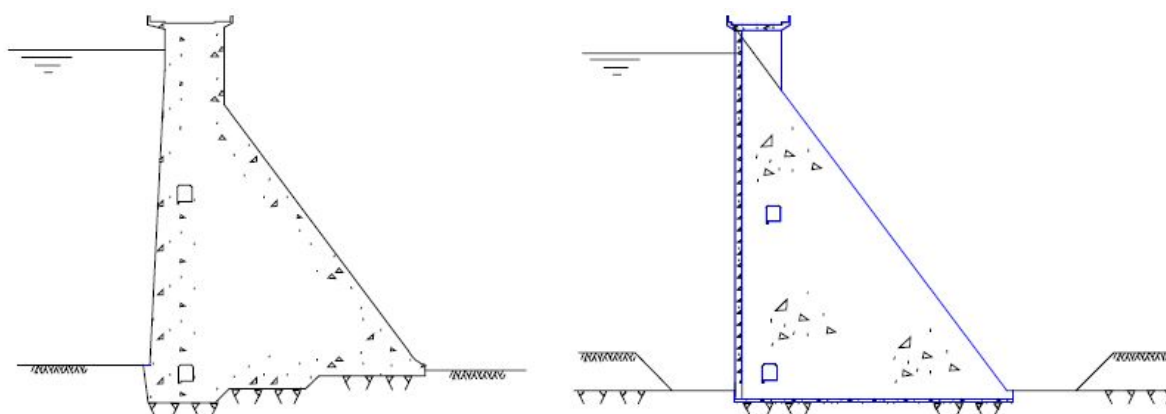
2.10.2 Barragem de Enrocamento

Quando construída com pedras lançadas e pedras arrumadas, manualmente ou mecanicamente, cujas seções transversais possuem forma intermediária entre a barragem à gravidade de concreto e a barragem de terra. Tais barragens possuem uma membrana impermeabilizante, geralmente no paramento ou talude de montante, ligada a um diafragma ligados na fundação (SOUZA, 1999).

2.10.3 Barragem de Concreto

A gravidade está para resistir aos esforços externos exclusivamente o seu peso próprio. Quando sua estrutura resiste aos esforços de tombamento, deslizamento, esmagamento e cisalhamento proveniente, em cada caso da pior situação de carregamento (SOUZA, 1999).

Figura 8 - Seção típica de barragem de concreto



Fonte: Eletrobras (2000).

2.11 Vertedouro

Vertedouro é o local por onde a água acumulada do reservatório passa através da barragem, de forma a evitar que se atinja a crista do reservatório, não causando danos à mesma ou aos equipamentos. Nos projetos de CGH podem ser definidos três tipos básicos de vertedouro: canal lateral, sobre o próprio corpo da barragem, ou a combinação dos dois. Geralmente é definido pela situação topográfica da barragem, bem como, pela vazão de projeto (ELETROBRAS, 2000).

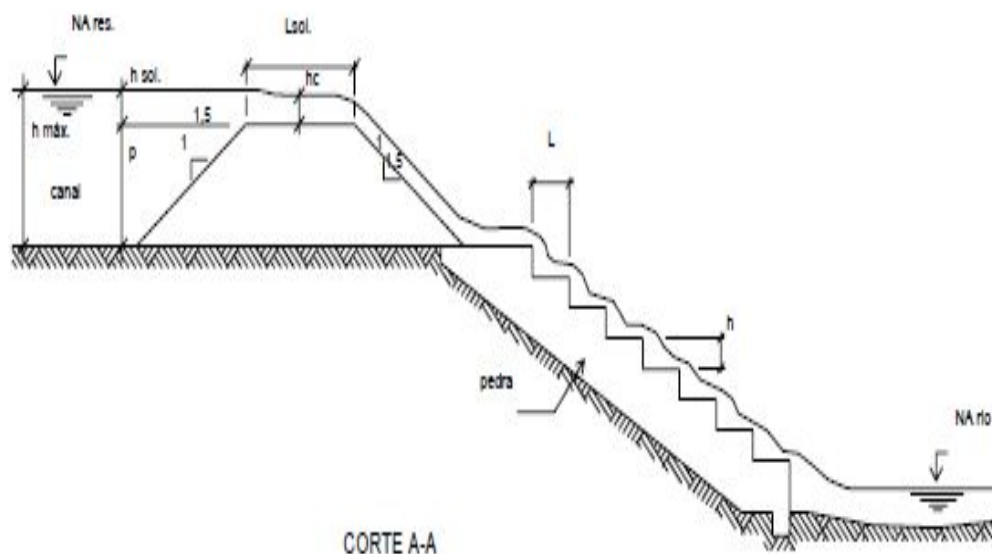
O vertedouro deve ter um projeto de operação segura, pois se apresentar falha na execução, pode conduzir a graves problemas na barragem e gerar grandes danos a propriedade. São críticas as determinações nos fluxos da inundação do projeto, em particular para as barragens tipo de terra e de enrocamento, que não podem suportar transbordamento. Devido à elevação do nível de água em córregos, os vertedouros geralmente devem ser projetados para o fluxo de alta velocidade desde que esta energia potencial adicional seja transformada em energia cinética. Não somente o vertedouro deve ser projetado para suportar

estas velocidades, mas também a estrutura terminal, ou o dissipador, que deve liberar o fluxo em uma velocidade pequena suficiente e produzir condições de modo que a barragem não seja colocada em perigo pela erosão da correnteza excessiva (ALVES, 2007).

2.11.1 Escada de dissipação

É uma estrutura de concreto armado, construída por blocos maciços com formato de escada, para atender necessidade de extravasamento sobre um vertedouro, cujo dimensionamento vai depender da dissipação de energia a jusante do barramento. Caso for identificado nessa região a presença de maciço rochoso fraturado, a qual não dissipar a energia do escoamento, deverá ser implantado tal método para proteger. Esses blocos serão estáveis ou não em função da velocidade do escoamento. A escada dissipadora, deve-se acompanhar a mesma inclinação natural do terreno quanto ao comprimento dos degraus devem ter no mínimo o dobro da sua altura, deve acompanhar a topografia natural do terreno, e sua largura deve ser a mesma do canal extravasor, devendo se desenvolver desde o final do canal até a calha do rio, protegendo o talude contra erosão com uso de blocos de rocha ou gabiões (ELETROBRAS, 1985).

Figura 9 - Esboço escada de dissipação



Fonte: Eletrobras (2000).

2.11.2 Canal extravasor

O extravasor é uma obra destinada para escoar os excessos de água acumulada pelos reservatórios ou barragens, projetada e construída evitando riscos de o nível da água atingir a crista do reservatório ou da barragem. Para os casos de lâmina livre sem comportar, se leva em conta o formato da crista e da parede de escoamento (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Já nos casos com extravasor de lado, deve ser construído sempre com baixa declividade, a entrada do canal deve ser afastada da barragem a uma distância em 1,5 vezes a largura do canal (ELETROBRAS, 2000).

2.12 Estrutura da tomada d'água

É o local destinado a captar a água retirada do reservatório, necessária para alimentar o funcionamento da turbina hidráulica, onde vai associada à alguns dispositivos de operação e manutenção estrutural da usina, grade de contenção, comporta, desarenador, extravasor e aerador. São variados os tipos e componentes do arranjo da tomada d'água, em função dos aspectos topográficos e geológico-geotécnicos de cada local (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Conforme Eletrobras (2000), a estrutura da tomada d'água deve ser dimensionada considerando-se a vazão máxima de projeto e a velocidade máxima na grade de contenção. Para obter uma área útil de escoamento no canal de adução, considera-se o tamanho da estrutura com sua respectiva largura.

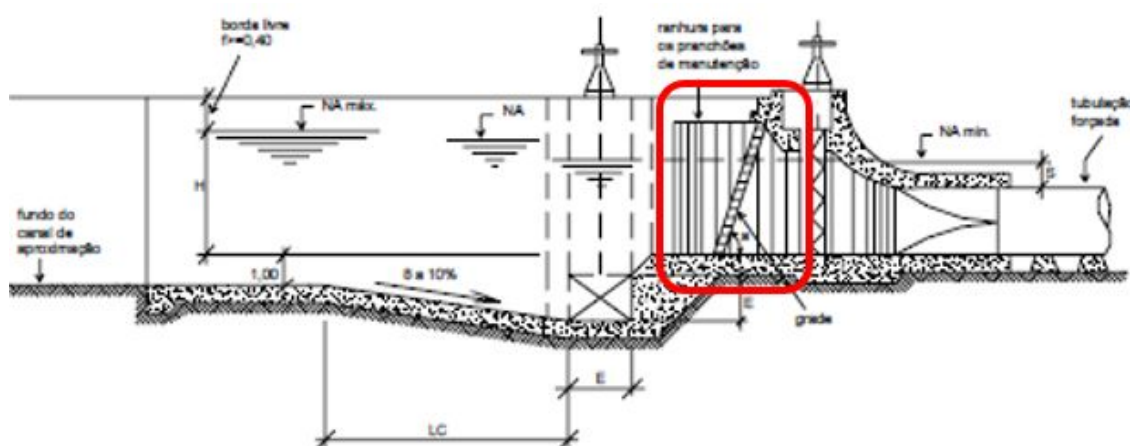
A tomada d'água deve ser construída de maneira a evitar a formação de vórtices junto a estrutura. Para isto, utiliza-se a fórmula de Gordon J. L. que define a submergência da aresta superior da boca de entrada da tomada d'água, onde se adota uma velocidade de escoamento na região da comporta, que varia conforme a altura do conduto de adução (ELETROBRAS, 2000).

Deve estar posicionada sempre que possível próximo à margem do reservatório ao longo de trechos retos, ou no caso de trechos curvos, deve estar localizada no lado côncavo, para evitar acumulação de sedimentos, que se depositam na parte convexa, e em uma posição que capte as vazões do curso d'água entre o nível máximo e mínimo, de tal modo, que atenda as cargas necessárias.

2.12.1 Limpa Grade

Grades de proteção tem a função de evitar que a água transporte objetos ou corpo estranhos que possam danificar o conjunto e mecanismos da turbina. Está situada à montante da tomada d'água e tem a função de impedir a entrada de sujeiras mais grosseiras, que possam danificar os equipamentos. A grade obedece à mesma inclinação do montante entre 75° a 80° e pode-se adotar espaçamentos entre 8 e 12 cm, com bitolas chatas ou redondas. Os sistemas de limpeza podem ser mecânicos, manuais ou hidráulicos, estes definidos pela NBR 7880 (ELETROBRAS, 2000).

Figura 10 - Estrutura de captação com tomada d'água



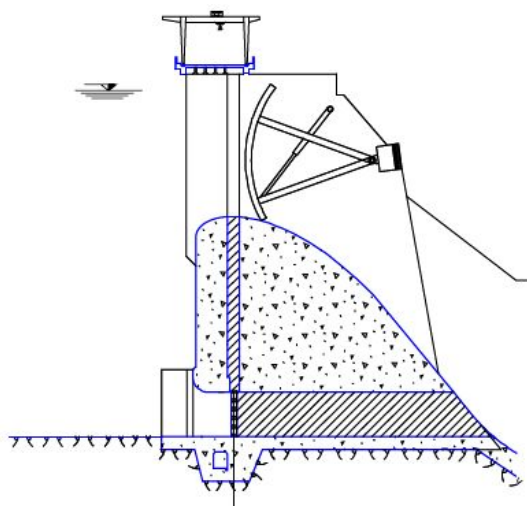
Fonte: Eletrobras (2000).

2.12.2 Comporta

É um equipamento mecânico utilizado para controlar a vazão hidráulica em um conduto livre ou forçado, que permite estancar ou liberar a água da tomada d'água, e que estão estabelecidas na NBR 7259/2001, que define seu tipo de movimento (translação, rotação e trans-lorrotação). Tem a função de fechar o acesso da água nos condutos (ALVES, 2007).

Já as comportas de limpeza têm a função de permitir a saída de areia ou outro material decantado no fundo do reservatório. Estão em pequenas dimensões, onde estão sujeitas a pressões grandes pelo seu posicionamento no reservatório (SOUZA, SANTOS e BORTONI 2009).

Figura 11 – Desenho esquemático de uma comporta



Fonte: Eletrobras (2000).

2.13 Tubo de Aeração

O tubo de aeração deve ser instalado a jusante da comporta da tomada d'água, para manter o equilíbrio das pressões externa e interna, para controlar a entrada de ar indesejada, visando evitar o colapso da tubulação. Adota-se tubo de aeração por ser a alternativa mais econômica, dentre outras soluções como reforço em anéis nas tubulações, aumento da espessura da tubulação ou instalação de ventosas. Em algumas situações, o conduto está sujeito a pressão externa sobre todo o seu perímetro, que ao ser esvaziado sofre pressão negativa (vácuo), do nível do gradiente dinâmico da tubulação, podendo causar colapso, deformação na chapa da parede da tubulação de aço, onde considera-se suficiente uma espessura da chapa acima de 0,6% do seu diâmetro interno (ELETROBRAS, 2000).

2.14 Desarenador

O desarenador é uma câmara que fica a montante da estrutura da tomada d'água destinada à decantação de materiais sólidos mais finos, com granulometria compreendida entre 0,1 mm e 10 mm, que são transportados pelo escoamento. Para se ter um bom rendimento do desarenador, a velocidade deve ser menor à 1 m/s na aproximação à tomada d'água (ORTIZ, 2014).

Conforme Manual da Eletrobras (2000), as pequenas barragens devem dispor de descarregador de fundo, próximo da tomada d'água. Devido ao assoreamento do reservatório, que produzirá um acúmulo de sedimentos, principalmente em épocas chuvosas.

Se a usina tiver túnel ou canal de adução até a casa de força, é necessário ter um desarenador adequadamente, posicionado para eliminação das areias que podem obstruir parcialmente o canal ou afetar o perfeito funcionamento das turbinas e demais equipamentos. Desarenador tem a função de permitir o esvaziamento da barragem e descartar o material decantado (ELETROBRAS, 2000).

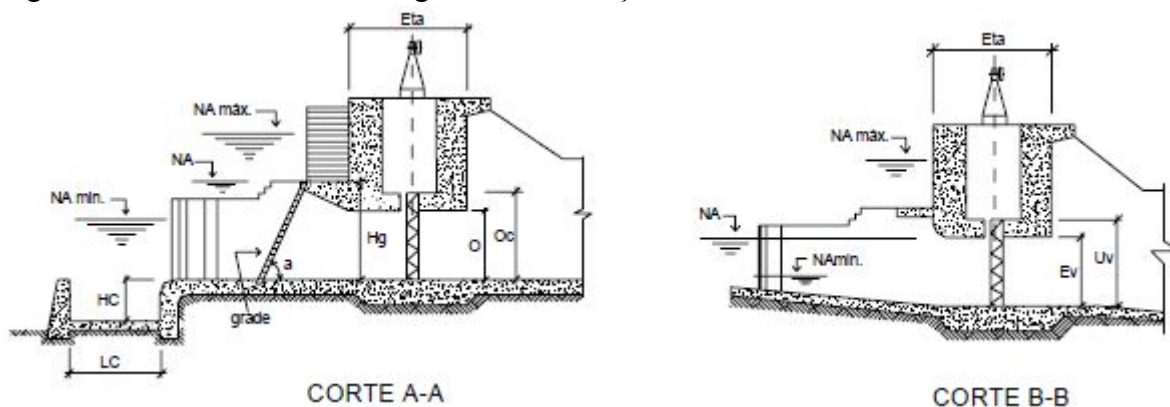
A Tabela 3 apresenta as dimensões mínimas e recomendadas para definição dos desarenador em função da vazão.

Tabela 3 - Dimensões do desarenador

VAZÃO (m³/s)	DIMENSÕES (m)				HC (m)
	MÍNIMAS		RECOMENDADAS		
	BC	LC	BC	LC	
0,1 < Q < 0,7	2,0	4,0	3,0	5,0	0,5
0,8 < Q < 1,6	3,0	4,5	3,5	0,6	0,6
1,7 < Q < 3,0	3,5	5,0	4,0	7,0	0,7
3,1 < Q < 6,5	7,0	4,0	11,5	5,0	0,9
6,6 < Q < 10,	8,0	5,0	15,0	6,5	1,1
10,1 < Q < 13,5	9,5	6,0	16,5	7,5	1,3
13,6 < Q < 17,0	11,0	7,0	18,0	8,0	1,5
17,1 < Q < 20,0	12,0	8,0	21,0	9,0	1,7

Fonte: Eletrobras (2000).

Figura 12 - Corte desarenador e grade de contenção



Fonte: Eletrobras (2000).

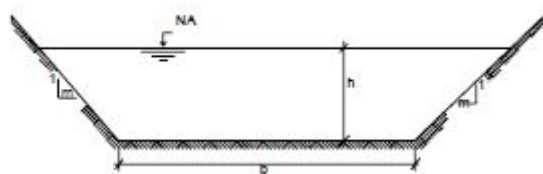
2.15 Sistema de Adução

É a estrutura que permite a condução da água do reservatório para adução entre a tomada d'água e o conduto forçado. O circuito de adução pode ser por canal de adução, túnel de adução, ou uma combinação dos dois. A escolha da seção típica mais adequada, depende das condições topográficas e geológico-geotécnicas para cada local a ser implantado. Geralmente, se atende um critério com sintonia ao projeto da tomada d'água considerando viabilidade técnica e econômica.

2.15.1 Canal de adução

É o canal por onde a água é conduzida, em um fluxo laminar, que vai da tomada d'água até a câmara de carga ligado ao condutos forçados. Posicionam-se usualmente a céu aberto. Quando não for viável a utilização dos canais, utiliza-se tubulações de baixa pressão. Existe um pequeno desnível entre o começo e o fim do canal de adução, para que facilite o deslocamento da água. O dimensionamento do canal de adução deve ser conduzido com base em um estudo econômico, objetivando a minimização da soma do custo da estrutura e do valor presente da energia perdida. Em princípio, o canal será dimensionado para o engolimento máximo das máquinas, considerando o reservatório em seu nível mínimo operacional. A velocidade máxima será da ordem de 2,5 m/s para canais escavados em rocha ou revestidos em concreto, e de 1,0 m/s para canais escavados em solo (ELETROBRAS, 2000).

Figura 13 – Corte esquemático canal de adução



Fonte: Eletrobras (2000).

2.15.2 Tubulação de baixa pressão

A tubulação de baixa pressão é uma alternativa de condução da água na ligação entre a tomada d'água e a entrada do conduto forçado. Os condutos de baixa pressão comumente apresentam baixas declividades e como resultado baixas velocidades de escoamento, é possível usar tubulações de concreto armado, aço ou de madeira armada. Em caso de galerias, dispensa coberturas e revestimentos. Dependendo das condições topográficas do local, pode ser considerada mais viável, do que a construção de um canal de adução com superfícies livres. A tubulação deverá ser apoiada em estruturas montadas para resistir aos esforços solicitados pelo peso e ações dos condutos (ALVES, 2007).

Os condutos de baixa pressão estão submetidos a uma condição de pressão externa, em seu perímetro, que ao ser esvaziado, tem ocorrência de uma depressão parcial, ou total (vácuo) do nível do gradiente dinâmico que ultrapassa a cota inferior do piso da tubulação, podendo causar uma deformação (afundamento) na chapa e o colapso da parede da tubulação (ELETROBRAS, 2000).

2.15.2.1 Espessura mínima da tubulação

Recomenda-se, por segurança, adotar para a tubulação de baixa pressão a espessura mínima de parede dos condutos forçados, tendo em vista, que qualquer defeito de laminação ou efeitos de corrosão afetam o valor da espessura percentualmente. Esse reflexo é maior nas chapas mais finas e é mais difícil a elaboração de uma boa solda nessas chapas. Além disso, a adoção da espessura mínima é recomendada por motivos construtivos, de montagem e transporte (ELETROBRAS, 2000).

No momento em que o líquido escoar pelas tubulações, válvulas e conexões, o fluido cede energia, tendo resistências ao escoamento, devido à atração molecular no próprio líquido, e às resistências próprias aos referidos dispositivos. Esta energia despendida pelo líquido ao escoar entre duas seções chama-se perda de carga. Que deverá ser calculado e considerado no seu dimensionamento (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

2.15.2.2 Diâmetro mínimo da tubulação de baixa pressão

O diâmetro mínimo da tubulação de adução em baixa pressão pode ser adotado como o que produz uma perda de carga por atrito igual a 1% da queda bruta. O dimensionamento é feito utilizando-se a fórmula de Scobey, para definir um diâmetro mínimo considera o coeficiente do material, conforme Tabela 04.

Tabela 04 - Valores de coeficiente conforme tipo de tubulação

Tubulação	Ka
Aço novo, com juntas soldadas ou sem costura	0,32
Cimento amianto	0,34
Concreto Armado	0,38

Fonte: Eletrobras (2000).

Conforme Eletrobras (2000), para definição da espessura da tubulação de adução, considera-se a pressão interna do conduto. Para definir o tipo do material, segue as especificações conformes NBR: o aço ABNT EB 255 CG 30 (ASTM-A283, Grau C), que deverá atender às características de tensão de escoamento, ruptura e resistência tração dessa classe de aço escolhido. Recomenda-se, por segurança, adotar a espessura mínima de parede dos condutos para a tubulação de baixa pressão, tendo em vista, que qualquer defeito de laminação ou efeitos de corrosão afetam o valor da espessura percentualmente. Assim, terá menor dificuldade em realizar emendas ou ligações com solda entre as chapas.

Diante disso, a adoção da espessura mínima é recomendada por motivos construtivos de montagem e de transporte.

2.16 Blocos de apoio ou selas para tubulação de baixa pressão

São estruturas de concreto armado, que dão sustentação aos condutos de alta e baixa pressão, estão para acomodar às tubulações do sistema de adução, os mesmos deverão atender dimensões mínimas bem como limites de distância entre eixos, para suportar as cargas do conduto mais água.

Segundo Souza (1999), os blocos de apoio ou selas terão que atender uma dimensão mínima, para resistir aos esforços solicitantes da tubulação. A base deve estar assentada em rocha ou terreno firme, em condições de sondagens, de modo que a tensão admissível de

compressão atenda às condições mínimas da tabela 05, e para a dimensão da base da sela deverá ser 1,5D. No entanto, para que o tubo possa deslocar-se facilmente sobre a sela recomenda-se usar uma chapa metálica de revestimento, assim poderá usar um menor coeficiente de atrito.

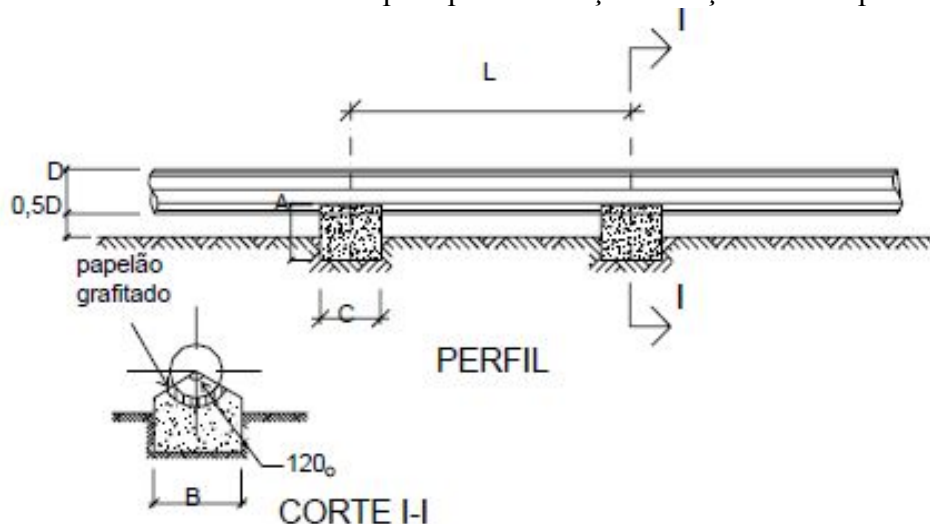
A força de atrito é gerada pela movimentação do tubo sobre a sela e a dilatação ou contração por aumento ou redução de temperatura. O apoio se encarrega de sustentar o conduto forçado, e facilitar seu deslizamento, através de uma sela metálica que vai sobre a estrutura de concreto (ORTIZ, 2014).

Tabela 05: Tensões Admissíveis

Solo de Apoio	σ_{ad} (Kgf/m ²)
Rocha Granítica	$4,2 \cdot 10^5$
Rocha calcária ou arenítica	$2,8 \cdot 10^5$
Pedregulho	$2,8 \cdot 10^5$
Argila dura	$1,5 \cdot 10^5$

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

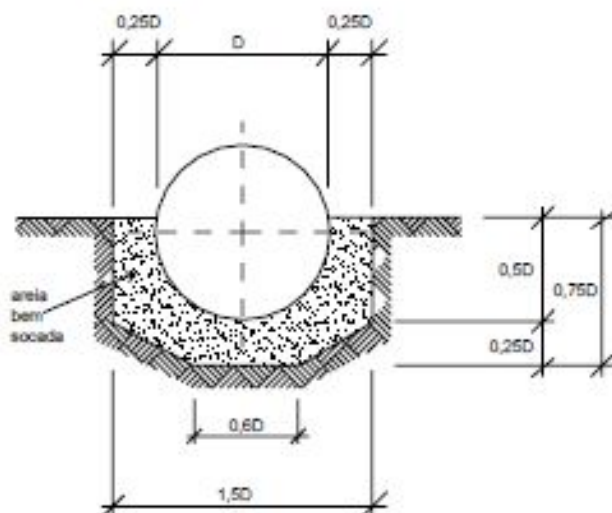
Figura 14 - Perfil dos blocos de apoio para tubulação em aço de baixa pressão



Fonte: Eletrobras (2000).

As tubulações de concreto poderão ser assentadas diretamente sobre o terreno, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Perfil da disposição dos blocos, para tubulação de concreto



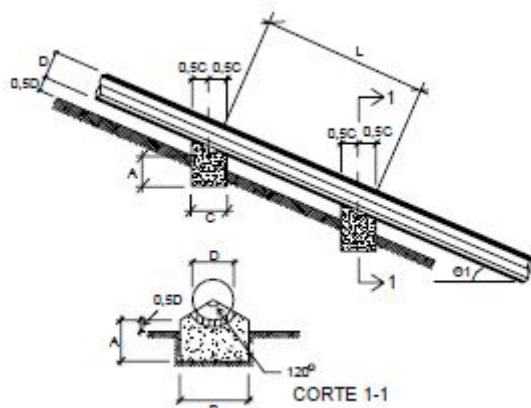
Fonte: Eletrobras (2000).

2.17 Blocos de ancoragem para conduto de alta pressão

São estruturas de concreto armado que são usados para suportar o conduto forçado, onde o mesmo é apoiado, permitindo assim seu deslizamento, tendo função de ancorar e absorver os esforços e carregamentos solicitantes, bem como, a vibração que se desenvolvem no conduto, em trechos retos longos e em pontos de mudança de direção (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Conforme manual de CGHs (Eletrobras, 2000), são utilizados blocos de concreto para suportar os condutos forçados, que fazem a ancoragem em curvas e em pontos intermediários. Estão limitados por um vão máximo, entre dois pontos de ancoragens consecutivos 30 m. Para pontos de apoio intermediário do tipo anel guia, no vão entre 12 e 30 m, em tubulações expostas, sugere-se a utilização de juntas de dilatação entre os dois pontos para absorver a movimentação longitudinal da tubulação.

Figura 16- Bloco de ancoragem para tubulação em aço



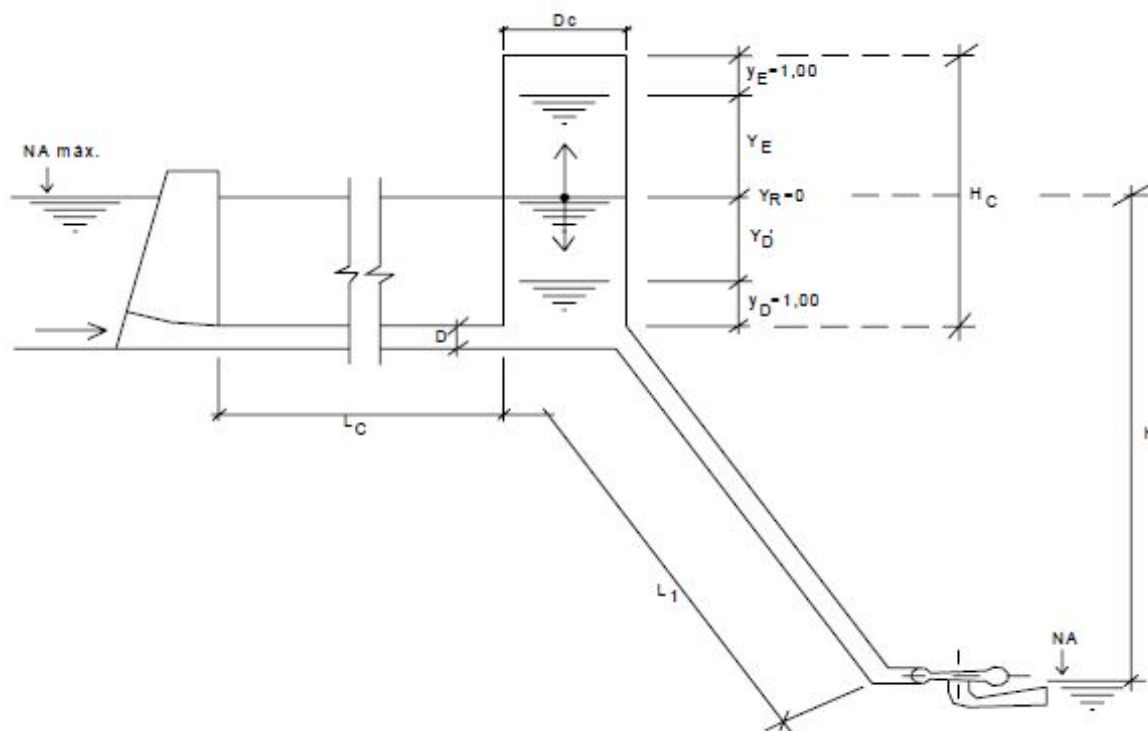
Fonte: Eletrobras (2000).

2.18 Chaminé de Equilíbrio

A chaminé de equilíbrio é um duto de eixo vertical, que tem a função de amortecer as variações de pressão que são transmitidas pelo conduto forçado, decorrente do fechamento brusco do dispositivo de controle de vazão. É responsável por aliviar e absorver os efeitos do golpe de aríete, além de armazenar a água para abastecer ao conduto forçado, mantendo o fluxo contínuo d'água no sistema, interrompida pela abertura da turbina (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Está posicionada entre o conduto de baixa e alta pressão, promovendo a transição entre o escoamento sob pressão no conduto forçado. Sempre que possível deve ser instalado o mais próximo da casa de força, encurtando o comprimento do conduto forçado, e consequentemente os efeitos do golpe de aríete.

Figura 17 - Chaminé de Equilíbrio, Central a fio d'água



Fonte: Eletrobras (2000).

A necessidade de instalação da chaminé de equilíbrio, acontecerá sempre que o comprimento do conduto forçado for cinco vezes maior que a queda bruta. A instalação da chaminé de equilíbrio deve ocorrer sempre que o tempo de aceleração for maior do que seis segundos (ELETROBRAS, 2000).

Conforme Souza, Santos e Bortoni (2009), a altura da chaminé de equilíbrio (H_c) é determinada em função da oscilação do nível d'água no seu interior quando as perdas no sistema adutor são desprezadas. Quando as perdas no sistema de adução são consideradas, a elevação máxima (y_E) é dado pela multiplicação do fator de perda de carga devido o efeito do golpe de aríete (h_s) pela elevação máxima do nível estático (y_e).

2.19 Tubulação forçada ou de alta pressão

O conduto forçado em uma usina hidrelétrica é a tubulação que leva a água, sob pressão, da câmara de carga até as turbinas. Usualmente, são construídos em concreto ou aço, e ficam apoiados em blocos de pedra ou concreto, chamados de blocos de sustentação, e engastado nos chamados blocos de ancoragem. Há um acentuado desnível entre o começo e o

fim do conduto forçado, para fornecer a queda necessária para que a água forneça energia suficiente para a turbina (CHADWICK, MORFETT e BORTHWICK, 2017).

Os condutos forçados, conduzem a água de um reservatório, ou de um sistema adutor para a casa de máquinas. São projetados, para tolerar altas tensões por causa da pressão estática da coluna d'água, e por causa do golpe de aríete criado pelas mudanças bruscas no fluxo d'água, provocados pelo fechamento e aberturas de válvulas e ou distribuidor da turbina (ORTIZ, 2014).

Por proteção, quando executados em galerias, devem ser revestidos para que não haja atritos provocadores de perdas dinâmicas. Em caso de estar a céu aberto deverão ter tratamento superficial, com pinturas ou revestimentos.

Conforme Manual da Eletrobras (2000), admite-se para o dimensionamento dos condutos com mesmo diâmetro ao longo de todo seu comprimento, velocidade máxima para cada tipo de tubulação conforme Tabela 06.

Tabela 06 - Relação de velocidade máxima por tipo de material

MATERIAL	V_{max} admissível (m/s)
Aço	5,0
Concreto	3,0

Fonte: Eletrobras (2000).

2.19.1 Espessura do Conduto Forçado

A espessura do conduto é determinada com base no golpe de aríete, e sua escolha se dá quando a tensão máxima permitida for maior que as tensões exercidas. Os condutos também estão sujeitos a ação de tensões adicionais como variação de temperatura, tensão de flexão e tensão longitudinal (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Para o dimensionamento da espessura do conduto forçado, deve-se levar em consideração o valor da sobrepressão para que ele tenha capacidade de suportar a pressão interna. Já o valor da depressão é utilizado para verificar se a linha piezométrica não corta a tubulação.

Conforme Eletrobras (2000), deverá atender um diâmetro mínimo, quanto ao cálculo da pressão total interna máxima, para o conduto forçado, deve ser calculada considerando o golpe de aríete, ou seja, somar a pressão hidrostática (P_i) com a sobrepressão (hs), que

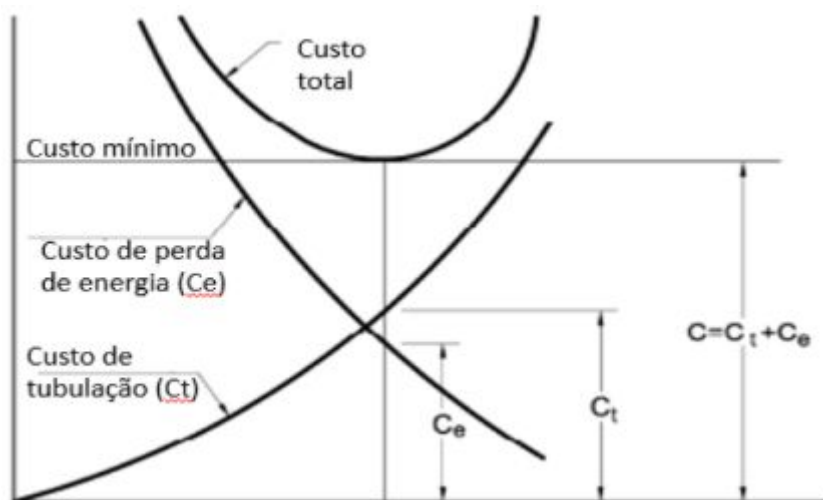
deverá ter um limite máximo de 20% da queda bruta ($0,2.H_b$), assim, obtendo a pressão total (P_t), do conduto.

2.19.2 Diâmetro Econômico

Para definir o diâmetro mínimo ou econômico do sistema de adução observa-se os parâmetros, definidos pela NBR 12296 (1991), que considera a viabilidade de instalação e implantação, perdas de carga hidráulica e custo de material, dessa somados os valores é possível estipular o valor mínimo.

O cálculo do diâmetro interno da tubulação forçada é um elemento bastante discutido e estudado há muitas décadas, com isso, deve-se considerar uma série de fatores para determinação do diâmetro interno econômico. Por exemplo, a perda de carga, o investimento inicial e os custos anuais de manutenção da tubulação. Um diâmetro maior para uma mesma vazão implica em uma perda de carga menor, e, conseqüentemente, uma maior queda disponível para geração de energia. Em contrapartida, diâmetros menores implicam em reduzidos custos de material, instalação e manutenção dos componentes hidráulicos. O gráfico a seguir expõe o caso. Há diferentes fórmulas para o cálculo do diâmetro interno econômico da tubulação forçada. É comum, inclusive, que as fórmulas possuam variáveis diferentes (ORTIZ, 2014).

Figura 18 - Representação da Curva do Diâmetro Econômico



Fonte: Ferreira (2019).

2.19.3 Variação de pressão no conduto forçado

Conforme a NBR 10132 (1987), a pressão máxima normal para funcionamento do conduto forçado é definida como a soma da pressão hidrostática e a sobrepressão decorrente do golpe de aríete. Em razão de ser um fenômeno constante durante a operação dos condutos, a análise da estrutura deve-se basear no golpe de aríete.

A pressão normal estática ao longo do conduto forçado sofre variações decorrentes do golpe de aríete quando há mudanças súbitas de vazão, resultantes de fechamentos ou aberturas rápidas, parciais ou totais, do dispositivo de fechamento da turbina. Essas variações de pressões, se dão conforme o engolimento repentino das turbinas, que podem serem estimadas pelo Método de Allievi, em casos de condutos com uniformidade de espessura de parede e de diâmetro interno (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

2.19.4 Transiente Hidráulico – Golpe de aríete

Quando ocorre uma mudança rápida na velocidade de escoamento, cria-se uma onda de pressão que percorre a tubulação, provocando choque entre estas ondas de pressão e som, decorrentes do transiente hidráulico do conduto forçado, que é produzido em função do tempo, das variações de velocidade, da compressibilidade do líquido e da elasticidade do tubo, também conhecido, como golpe de aríete. O golpe de aríete, também pode ocorrer pelo fechamento parcial do conduto, quando for submetido a máxima sobrepressão, pelo fechamento em tempo inferior ao crítico, provocando a celeridade das ondas de choque (HENN, 2001).

Segundo Alves (2007), a variação da pressão positiva ou negativa que resultam das manobras de partida ou fechamento das válvulas ou registros, onde produzem uma onda de choque que atinge o sistema hidráulico, que ocorre quando é aberta uma saída para escoamento da água, e quando resolve-se fechá-la, para a interrupção do fluxo, causaram um sobre pressão dentro do tubo. Que podem ocasionar problemas estruturais, como deformações, rachaduras e rompimento dos condutos.

Estes fenômenos podem ser calculados, através da fórmula de Allievi, que relaciona a celeridade de parada, com velocidade com que a onda de pressão se desloca em uma tubulação, e sua propagação no circuito hidráulico.

2.19.5 Perdas de carga no conduto forçado

O líquido ao escoar transforma parte da sua energia em calor, essa energia, não é mais recuperada na forma de energia cinética e/ou potencial, e por isso, determina-se perda de carga, ao longo da tubulação, ou seja, perda de carga contínua e localizada, devido a presença de conexões como curvas, válvulas, registros, etc. (HOUGHTALEN, HWANG e AKAN, 2012).

Segundo Chadwick, Morfett e Borthwick (2017), as perdas de carga localizadas, se dão pela formação de vórtices, no fluido nas conexões, para situações de tubulações de longas distâncias podem ser desprezadas.

2.19.5.1 Perda de carga por atrito no tubo

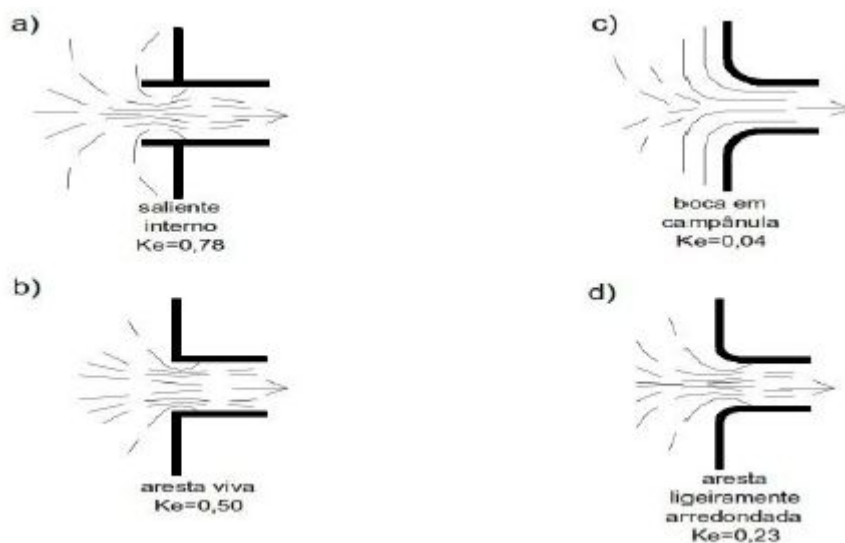
A perda de energia causada pelo atrito em uma tubulação é denominada de perda de carga (h_f). Trata-se da perda de carga, causada por atrito entre a parede do tubo e a dissipação da viscosidade na água, ou perdas devido à altura de atrito. Logo, as diferentes resistências de escoamento independem da pressão linear ao longo do comprimento do tubo (L), mas é inversamente proporcional a força do diâmetro do tubo (D) e relacionada a rugosidade do tubo se o fluxo for turbulento. Os projetos que apresentam seção e declividade uniforme com escoamento em superfície livre, sem curvas, podem ser apurados somente a perda de carga em consequência do atrito. O comportamento do fluxo em tubos foi avaliado por Henri Darcy (1803-1858), que destaca que muitas perdas de carga por atrito ocorrem na descarga. O fator de atrito em fluxo turbulento, quando no número de Reynolds se aproxima de um valor mais alto ou seja $NR > 2000$. O fluxo no tubo se torna praticamente turbulento e valor de fluxo se torna menos dependente do número de Reynolds, porém, mais dependente da rugosidade relativa, do tubo onde pode ser obtidas através das medida de altura, rugosidade relativa das irregularidades das paredes do tubo e do seu diâmetro (HOUGHTALEN, HWANG e AKAN, 2012).

2.19.5.2 Perda de carga na entrada da tubulação

Há também perda na entrada do conduto onde é considerada a velocidade média imediatamente a jusante da entrada (m/s) e um coeficiente (K_e) variável em função da forma

da boca do conduto, conforme Figura 19, a qual apresenta diferentes formas de boca na entrada da tubulação.

Figura 19 – Modelo de perda carga na entrada da tubulação



Fonte: Eletrobras (2000).

2.19.5.3 Perda de carga em expansão da tubulação

Conforme Houghtalen, Hwang e Akan (2012), o comportamento da linha de energia e da linha hidráulica na proximidade de uma expansão brusca da tubulação, a linha do fluxo se separa da parede do tubo maior, e deixa uma área de estagnação relativa entre as paredes, a qual se forma um redemoinho para preencher o espaço. Maior parte da energia perdida em uma expansão brusca acontece quando se conectam as linhas de fluxos às próprias paredes. A recuperação de pressão acontece com a diminuição da velocidade no tubo, logo, o jato em alta velocidade diminui gradativamente até alcançar o equilíbrio, voltando as condições normais de fluxo.

2.19.5.4 Perda de carga em curvas da tubulação

O fluxo do tubo no entorno de uma curvatura provoca um aumento de pressão ao longo da parede externa e uma diminuição de pressão ao longo da parede interna. No sentido do fluxo e a certa distância da curvatura a velocidade e pressão assumem distribuições normais e maiores nas proximidades das paredes interna e menor na parede externa. A demanda simultânea de energia pode causar a separação entre a corrente e a parede interna, além disso, o desnível de pressão na curvatura, cria uma corrente transversal a velocidade,

portanto, as perdas de carga na curvatura está relacionada com a razão entre o raio de curvatura (R) e o diâmetro do tubo (D). A perda total de uma série de curvaturas agrupadas não depende somente do espaço entre elas, mas também da sua direção, pois é aproximadamente proporcional ao seu ângulo (α) (HOUGHTALEN, HWANG e AKAN, 2012).

Segundo Alves (2007), há uma perda de carga no momento em que o líquido escoar pelas tubulações, válvulas, conexões e órgãos de máquinas, cedendo energia para vencer as resistências que se oferecem ao seu escoamento, devido à atração molecular no próprio líquido, esta energia é despendida por caminhos que o fluido percola.

2.19.5.5 Perda de carga por redução da seção

Outra situação de perda de carga é em contração ou redução de tubos, a qual, uma redução brusca costuma causar uma diminuição na pressão no tubo, tanto devido ao aumento da velocidade quanto à perda de energia pela turbulência.

2.19.6 Sobrepressão interna do conduto

Conforme, Eletrobras (2000), o valor de sobrepressão é necessário para o dimensionamento da espessura da tubulação, para suportar a pressão interna. Já o valor de depressão, é necessário para verificar se a linha piezométrica, durante o golpe de aríete não corta a tubulação, a fim de evitar pressões negativas no seu interior. Pressões negativas podem provocar um afundamento das paredes da tubulação.

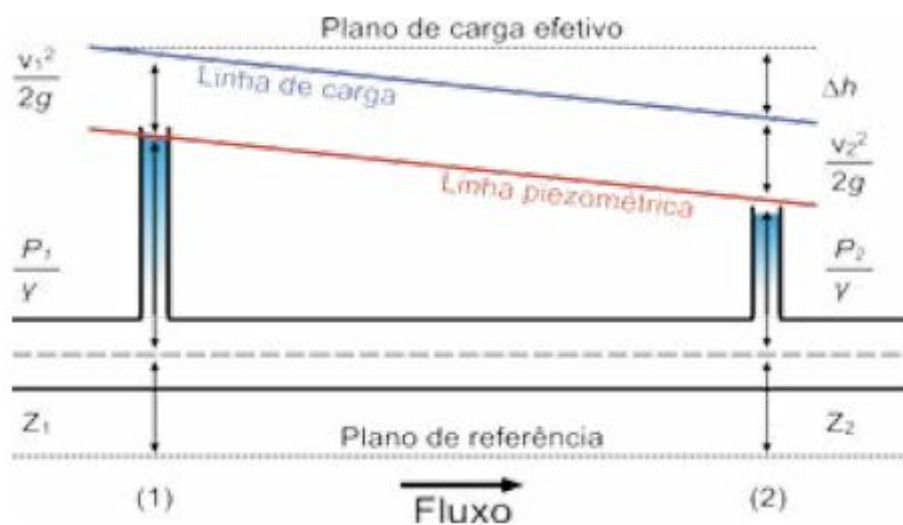
2.19.7 Pressão externa do conduto

Em alguns casos o conduto pode render-se a pressão externa sobre seu perímetro inteiro, como por exemplo, quando é esvaziado sem os cuidados necessários ou quando não funciona a aeração. A ocorrência de uma depressão parcial, ou total (vácuo), do nível do gradiente dinâmico que ultrapasse a cota inferior do piso da tubulação, poderá causar uma deformação (afundamento) na chapa e o colapso da parede da tubulação (ELETROBRAS, 2000).

2.20 Linha de carga e linha piezométrica

A linha de carga de uma tubulação nada mais é que uma linha geométrica dos pontos representativos de três cargas, de velocidade, pressão e posição. A linha piezométrica corresponde às alturas que o líquido subirá, devido as depleções no sistema, quando alcançar a elevação em um ponto acima do centro da tubulação, a uma distância igual à pressão existente, também denominada de gradiente hidráulico. A linha de carga (ou de energia) representa a energia total do fluido, sendo formada pelos pontos distantes e acima da linha piezométrica, ou seja, à distância acima do centro da tubulação. Para velocidades constantes, a linha de carga é paralela à linha piezométrica. Tanto a linha piezométrica como a linha de carga inclinam-se para baixo, na direção do escoamento no interior da tubulação, como consequência da perda de carga distribuída no interior do tubo que, conforme a velocidade do escoamento, se aproxima de zero, e ambas as linhas tendem a se aproximar. (HOUGHTALEN, HWANG e AKAN, 2012).

Figura 20 – Representação das linhas piezométrica e de carga



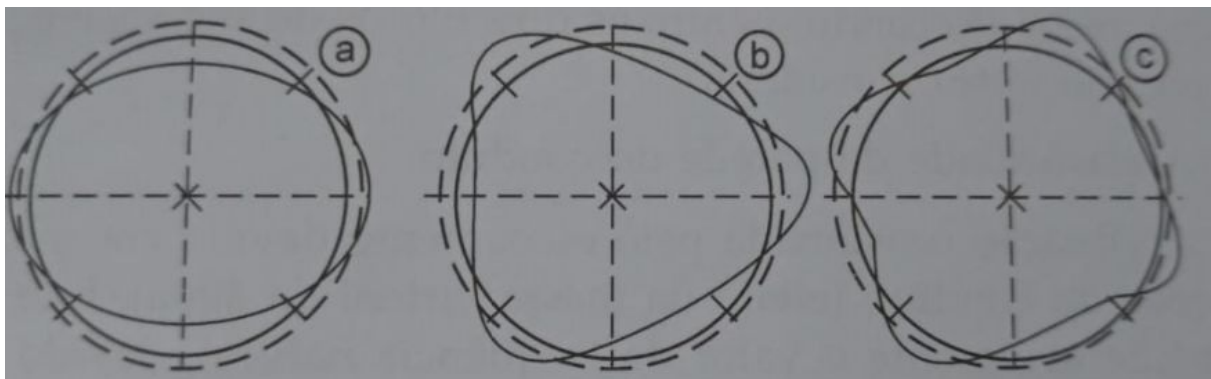
Fonte: Houghtalen, Hwang e Akan (2012).

2.21 Vibrações no conduto forçado

As vibrações em conduto forçado, acontece geralmente quando há uma onda de pressão gerada pelo rotor da turbina hidráulica, também acontece, quando existe uma diferença de frequência de vibração, pois, ao se tocarem produzem uma ressonância, produzindo assim, uma vibração excessiva, vindo a ocasionar um colapso do conduto, que

geralmente são provocadas pela operação da turbina hidráulica e vórtice no tubo de sucção. Existem outras causas de vibração de menor intensidade, dentre elas destaca-se: vibrações por escoamento, tais como transiente hidráulico devido a variação de carga, e turbulências da variação da vazão e mudanças de direção no escoamento quando o conduto alimenta mais de um grupo gerador. Portanto, é recomendado que as frequências de vibrações por elas causadas fiquem o máximo possível afastado das frequências normais, assim reduzirá os riscos de vibração. Segue conforme a Figura 21 às diferentes direções de vibração (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Figura 21 – Direções das vibrações: (a) Três (b) Quatro (c) Cinco



Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

2.22 Tempo crítico de fechamento

O tempo crítico (T_c) do conduto forçado, ou seja, o tempo que a onda de pressão leva para percorrer todo o conduto, do dispositivo de fechamento até o reservatório ou a chaminé, é definido pela relação do dobro comprimento do conduto forçado (L), pela celeridade da onda de choque (a). Devido ao tempo de fechamento da turbina ser, em geral, muito superior ao tempo crítico do conduto forçado, existe sempre a possibilidade de um fechamento a partir de uma abertura parcial que se complete em um tempo praticamente igual ao crítico. Para o tempo de fechamento das turbinas, considera-se, quando as turbinas não têm uma recomendação do fabricante, $t = 6,0$ s em condutos curtos com comprimento menor ou igual a três vezes a queda bruta e, $t = 10$ s para comprimento maior ou igual a três vezes a queda bruta (ELETROBRAS, 2000).

2.23 Cavitação

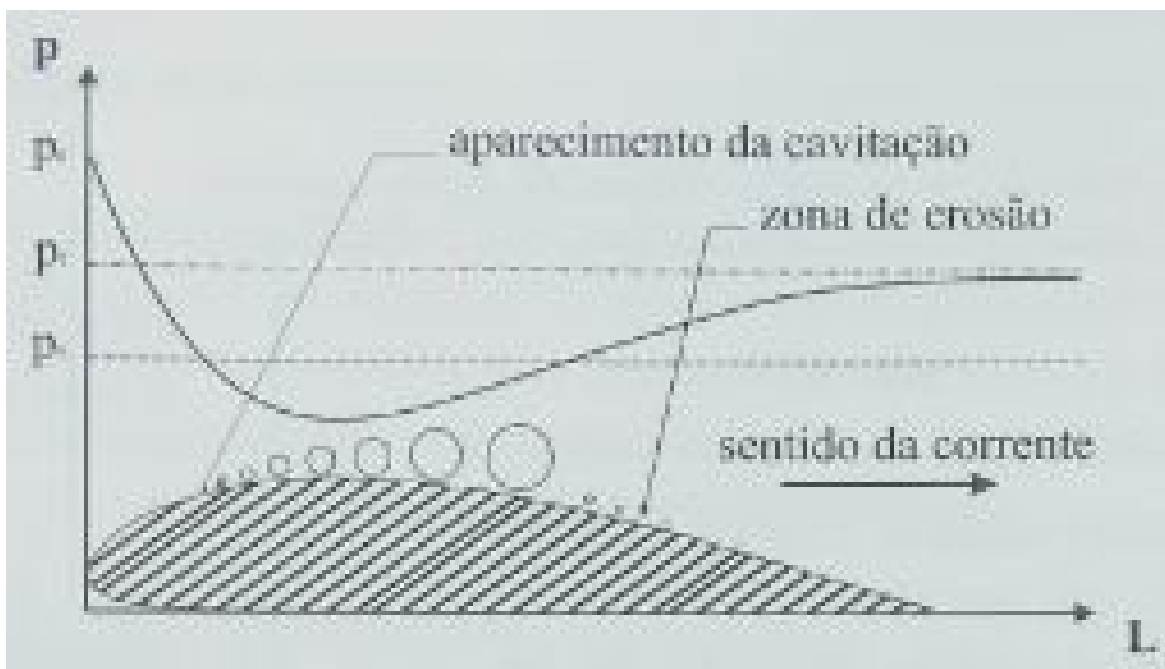
A cavitação está relacionada com a separação da coluna líquida, que é a obstrução do escoamento causado por bolhas, a qual são formadas por gases dissolvidos na água, que se desprendem do líquido a uma redução de pressão de vapor. As bolhas tendem a aumentar seu tamanho com a liberação dos gases, tornando um fluxo intermitente. Onde pode ser calculada através da equação de Bernoulli. Caso a pressão normal for menor ou igual a pressão de vapor, deve haver separação da coluna líquida. Assim, ocorre o fenômeno da cavitação, neste processo se dá a formação de cavas ou bolhas no líquido, que podem implodir pela ação da pressão externa, produzindo um colapso devido ao choque entre as partículas fluidas, provocando flutuações nas pressões e danificando as paredes do conduto, assim reduzindo a capacidade de escoamento (BAPTISTA e COELHO, 2014).

Conforme Henn (2001), cavitação decorre das consequências de um fenômeno hidráulico que acontecem em máquinas de fluxo que trabalham com líquidos em determinadas condições de operação. Consiste, na formação de um colapso, no seio de um líquido em movimento formando bolhas, em grande parte por vapor e gases, que não se dissolvem com o líquido. Portanto, a formação de cavidade macroscópica de um líquido se dá a partir dos núcleos gasosos microscópicos, que devido a valores iguais ou inferiores de pressão, na temperatura que se encontra. Mais precisamente acontecem na transição entre o rotor e o bulbo de sucção de uma turbina hidráulica. Geralmente acontece nas turbinas de alta velocidade, que apresentam zonas de baixa pressão, conseqüentemente, se dá uma queda na velocidade da corrente fluida neste local. Ao ser arrastadas pela corrente em escoamento para regiões de pressão mais elevada, as bolhas vão aumentando de tamanho até que o local em que a pressão se torna novamente superior à pressão de vaporização da água. Onde o vapor condensa repentinamente, deixando vazios que são preenchidos instantaneamente pela água circulante, formando uma implosão das bolhas, que como comparação define-se que o volume específico da água na fase de vapor a 17°C é de $(69,67 \text{ m}^3/\text{Kg})$ por tanto, é 69600 vezes maior que a fase líquida que é de $0,001001 \text{ m}^3/\text{Kg}$.

As partículas que ocupam o espaço deixado pela implosão das bolhas, se chocam, gerando picos de alta pressão, gerando ondas de choque semelhante ao golpe de aríete. As superfícies metálicas que se encontram próximas das áreas de colapsos das bolhas, são atingidas por golpes de alta concentração, que sofrem excessivos desgastes no material, formando pequenas crateras.

A cavitação gera baixo rendimento e potência das turbinas, provocam grandes vibrações, nas estruturas da máquina, comprometendo assim todo seu funcionamento (HENN, 2001).

Figura 22 – Cavitação em uma máquina de fluxo axial



Fonte: Henn (2001).

O aparecimento de bolhas cheias de vapor ou seja, a pressão na qual ocorre a mudança de estado líquido para vapor e vice-versa depende da temperatura, conforme representada.

Tabela 07 – Relação de pressão do vapor d'água

Pressão de Vapor (mca)	Temperatura (°C)
20	0,0234
40	0,0738
60	0,199
80	0,474
100	1,013

Fonte: Henn (2001).

2.24 Juntas de Dilatação

O sistema de adução, quando exposto às variações de temperatura, estará sujeito a movimentos de contração e dilatação. Os condutos de aço são divididos em várias seções,

simplesmente apoiadas em berços de concreto, firmemente ancorada em blocos de ancoragem, que geralmente coincidem com mudanças de direção. Entre cada dois pontos de ancoragem consecutivos são inseridos uma junta de expansão (Dilatação), que são projetados em anéis de comportamento elástico com fina espessura, com paredes com capacidade de suportar as tensões combinadas, correspondentes ao trabalho de sob pressão interna. Os momentos de flexão corresponderão as reações nos suportes, onde são transmitidos por tensão de cisalhamento, entre chapa e os anéis. Para isso, os anéis são soldados na chapa com soldas contínuas, endurecidos por diafragmas (PENCHE 1998).

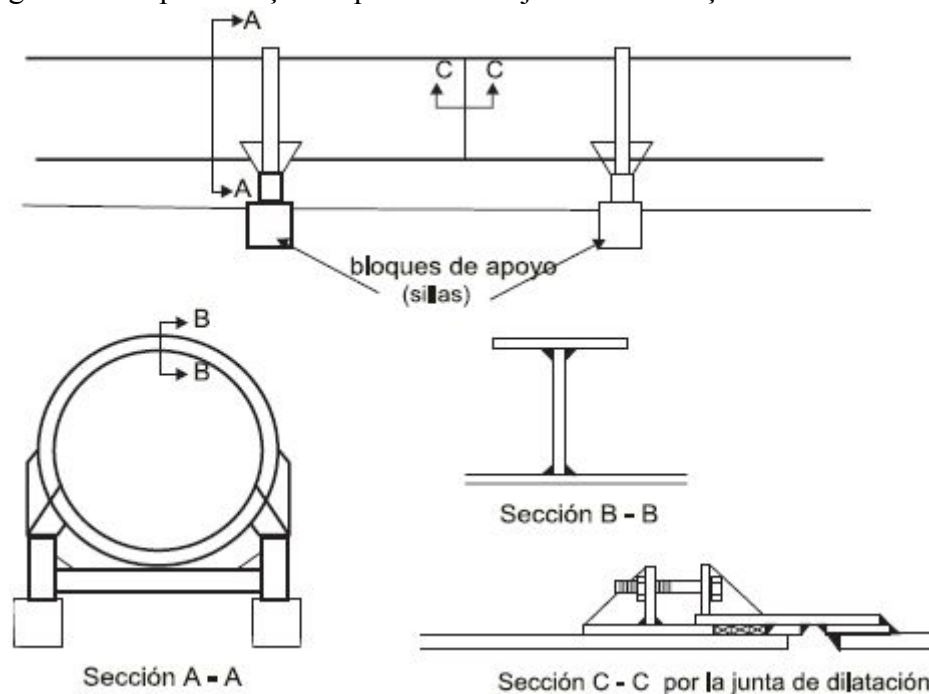
Segundo Penche (1998), dependendo da topografia do terreno, o sistema de adução requer, grandes dimensões para os blocos de ancoragem, o qual demandam, grande volume de concreto, tornando-se inviável economicamente, portanto, recomendando-se em mudanças bruscas de direção a instalação de juntas de dilatação.

Existem muitos tipos de juntas de expansão, os modelos com gaxetas, onde seu fechamento é formado por anéis, comprimido por uma peça deslizante em aço aparafusado a uma flange presa ao tubo. As do tipo fole, que é usada apenas em tubos de paredes finas; o fole se expande ou contrai para absorver o movimentos longitudinais causados por mudanças bruscas temperatura.

Existe uma grande variedade de materiais para tubos de grandes espessuras e diâmetros o tubo de aço soldado, com articulações longitudinais e circunferenciais, ainda é a solução preferida, porque é relativamente barato e porque pode ser alcançado com o diâmetro e a espessura exigido. Para ambientes com baixas temperaturas pode ser interessante usar aço resistente à corrosão do tipo Corten, que além de possuir maior resistência à tração, assim permite tratamentos nas tubulações contra corrosão (PENCHE 1998).

Conforme Manual de Micro Central Hidrelétrica, para Penche (1998) é necessária para compensar a corrosão, interna e externa, adotar uma espessura mínima de paredes dos tubos e juntas, para facilitar a ligação nas manutenções entre os tubos sem deformar, pois tubo de aço com juntas flexíveis não precisam de juntas de dilatação, uma vez que absorvem os pequenos movimentos longitudinais .

Figura 23 -Representação esquemática de junta de dilatação



Fonte: Penche (1998).

2.25 Outras instalações das CGHs

2.25.1 Casa de Força

A casa de força é onde está instalado o maquinário da usina: Turbinas, Geradores, Painéis e Reguladores de Tensão, etc. A construção da casa de força pode ser separada, ou incorporada ao barramento, no caso de CGHs onde o desnível é criado pela própria barragem.

2.25.2 Turbinas Hidráulicas

As turbinas podem ser definidas como máquinas hidráulicas de impulso ou de reação, e têm como função principal transformar a energia potencial oriunda da queda d'água em potência no eixo que depois, junto a um gerador, transforma em energia elétrica. Existem diversos tipos de turbinas, onde destacam-se quatro tipos: Kaplan, Pelton, Bulbo e Francis; onde cada uma desses modelos são adequados para certa faixa de altura de queda.

Recebem a água vinda pelo conduto forçado, e passa por um sistema de palhetas/guias móveis, que controlam a vazão volumétrica fornecida à turbina. No intuito de regular a potência, as palhetas podem se abrir (aumentar) ou fechar (diminuir). Na sequência desta etapa, a água chega ao rotor da turbina, onde a energia cinética é transferida em forma de

torque para o rotor, a uma determinada velocidade de rotação. Após passar pelo rotor, um duto chamado tubo de sucção que despeja a água a jusante do rio (ORTIZ, 2014).

2.25.2.1 Turbina Kaplan

As turbinas Kaplan operam em quedas de 20 m até 50 m, diferenciam-se entre as turbinas Kaplan e a Francis por sua forma do rotor. Assemelha-se a um propulsor de navio (similar a uma hélice) com duas até seis pás móveis. Possuem, um sistema de êmbolo e manivelas montado dentro do cubo do rotor, que é responsável pela variação do ângulo de inclinação das pás, que é acoplado as palhetas do distribuidor, de modo que para uma determinada abertura, corresponde a um valor de inclinação para o rotor (ORTIZ, 2014).

2.25.2.2 Turbina Francis

Este é um tipo de turbinas hidráulicas, que são mais adequadas para uso a quedas de 40 m até 400 m. O princípio de operação se assemelha ao de uma roda d'água, onde a água que ao passar pela turbina, perde sua pressão, transferindo energia para o rotor, que a faz girar o distribuidor de maneira que a água ao passar pela turbina fica próxima do eixo (ORTIZ, 2014).

2.25.2.3 Turbina Pelton

As turbinas do tipo Pelton são adequadas para operações em quedas de 350 m até 1100 m, sendo assim mais utilizadas por países montanhosos. Ela opera com velocidades de rotação maiores em comparação com outras e tem o rotor de características bem distintas. A turbina Pelton possui bocais, que lançam jatos d'água de encontro às “conchas” presentes no rotor, gerando movimento. O número de bocais varia de dois a seis, com espaçamentos iguais que garantem um balanceamento dinâmico do rotor (ORTIZ, 2014).

2.25.2.4 Turbina Bulbo

Este tipo de turbina vem sendo cada vez mais adotada, em razão de fatores ambientais e, principalmente, por terem custos menores em sua construção e em sua operação, em vista de que as suas dimensões são menores quando comparadas a outros tipos de turbinas.

As turbinas de bulbo trabalham em quedas abaixo de 20 m e foram inventadas inicialmente, na década de 1960, na França, para a Usina Maremotriz de La Rance e depois desenvolvida para outras finalidades. Contém nela, uma turbina similar a turbina Kaplan horizontal, porém, devido a baixa queda, o seu gerador hidráulico se posiciona em um bulbo por onde a água flui ao seu redor antes de chegar as pás da turbina (ORTIZ, 2014).

2.26 Comportas - Válvula de segurança a jusante da tomada d'água

Conforme Eletrobras (2000), as comportas são portas móveis que servem para regular e controlar a passagem (escoamento) de água. Elas têm como objetivo, barrar a passagem hidráulica, operando abertas ou fechadas, dependendo da função desejada. As comportas ficam fora de operação quando estão auxiliando a inspeção e a manutenção das estruturas civis, permanecendo assim normalmente abertas.

É o dispositivo mecânico ou hidráulico usados para controlar as vazões hidráulicas no conduto forçado, conforme a estrutura e terminologias física e operacionais classificadas pela (NBR 7259/2001).

Essa válvula de segurança assume as funções da comporta de emergência da tomada d'água, cessando o fluxo de água para a proteção da usina, em caso de alguma falha no sistema. Ela também é acionada em casos de manutenções preventivas, que permitem o esvaziamento da caixa espiral e do tubo de sucção. Para serem abertas, é acionado um cilindro hidráulico com pressão do regulador de velocidade. Seu fechamento, é realizado por contrapeso conectado diretamente ao eixo do disco da válvula, com a abertura de uma válvula solenóide, desloca o óleo da parte inferior de cilindro hidráulico (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

2.27 Gerador Elétrico

O gerador elétrico é responsável por transformar a energia mecânica gerada pela turbina em energia elétrica. Em CGHs, os geradores usados podem ser tanto assíncronos, como síncronos. Os geradores assíncronos são utilizados em usinas de até 1 MW, e possuem um custo menor, tanto de manutenção quanto para aquisição (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

2.28 Canal de fuga e bacia de dissipação a jusante

O canal de fuga é por onde passa água, descarregada pela turbina, que então retorna para o rio. Situa-se na saída da casa de força, conduzindo a água para a bacia de dissipação, que tem como objetivo dissipar a energia da água, evitando a erosão e o assoreamento do rio. Logo após, a casa de máquinas inicia o canal de fuga, que tem a função de restituir ao rio a água turbinada. Sua instalação deve ser realizada tangencialmente ao leito do rio, permitindo um retorno da água ao seu leito normal de maneira mais adequada (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

2.29 Transformadores elevadores

Tem a função de elevar a tensão da energia produzida pelo gerador. Geradores de CGHs produzem em uma tensão entre 220 V a 13,8 kV, enquanto as linhas de transmissão operam em tensões que variam de 13,8 kV a 500 kV, dependendo da distância entre a usina e o centro consumidor. Por isso, para que a energia gerada na PCH possa ser integrada à rede, são necessários transformadores elevadores (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

2.30 Subestação

É uma instalação elétrica de alta potência, que contém equipamentos para a transmissão e distribuição, controle e proteção da energia gerada. Na subestação estão presentes os seguintes equipamentos: transformadores de corrente, transformadores de potência, disjuntores, para-raios e seccionadores.

Em operação interligada a um sistema elétrico, se aplica um sistema de proteção compatível com o sistema que já está em uso no ponto de interligação. Quando a subestação for ligada a um sistema elétrico existente, esses equipamentos deverão ser adequados para os níveis de curto circuito no sistema, considerando futuras expansões previstas (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

Este estudo teve por objetivo avaliar o dimensionamento do sistema de adução da CGH Taipinha, e suas características quanto aos aspectos físicos e operacionais.

A CGH Taipinha é de propriedade da CERFOX - Cooperativa de Geração de Energia Fontoura Xavier. Está instalada no rio Lajeado Taipinha, afluente do rio Fão, com uma área de drenagem de aproximadamente 33 km², que escoar na direção sudeste com uma extensão aproximada de 11 km, com um desnível de 240 m até a sua foz. Localizada no município de Soledade-RS, entre as coordenadas 53° 30' a 53° 35' de longitude oeste e 28° 52' a 28° 57' de latitude sul. Pode ser acessada por uma via secundária de estrada de chão, no quilômetro 270 da rodovia (BR 386). A localização e o traçado dos elementos da PCH Taipinha estão representados na Figura 24.

Figura 24 – Traçado dos elementos da PCH, da barragem até casa de máquinas

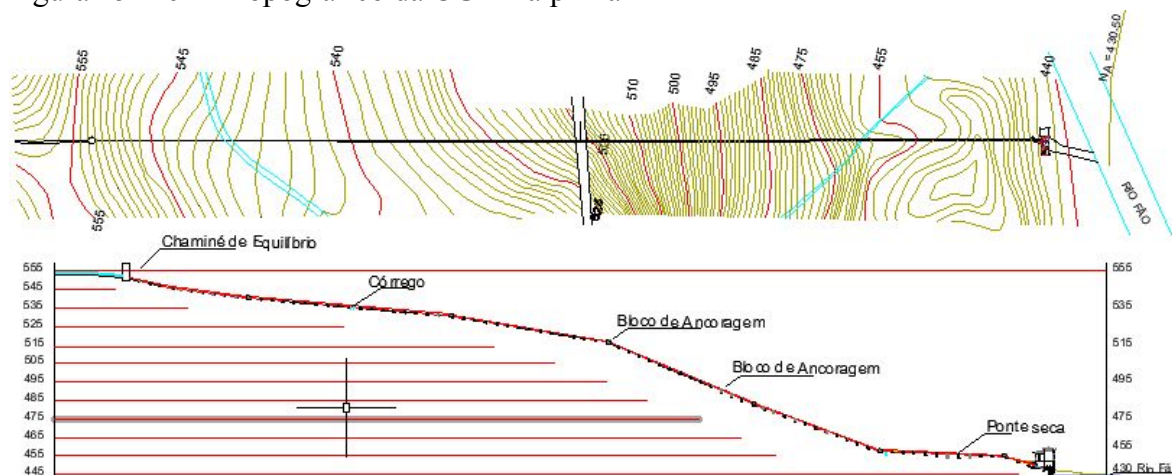


Fonte: Google Earth (2020).

A CGH Taipinha está em operação desde junho de 2011, com uma potência instalada de 1200 KW, e vazão remanescente de projeto de 1,24 m³/s com queda bruta de 113,5 m. A usina conta com duas turbinas do tipo Francis espiral, com perfis hidráulicos otimizados de elevado rendimento final, com 730 cv e 1200 rpm no rotor.

Os elementos estruturais que compõem a CGH Taipinha, estão localizados em diferentes cotas, conforme dados topográficos, apresentados na Tabela 08 e perfil topográfico que poderá ser visto na Figura 25.

Figura 25- Perfil Topográfico da CGH Taipinha



Fonte: Cerfox (2020)

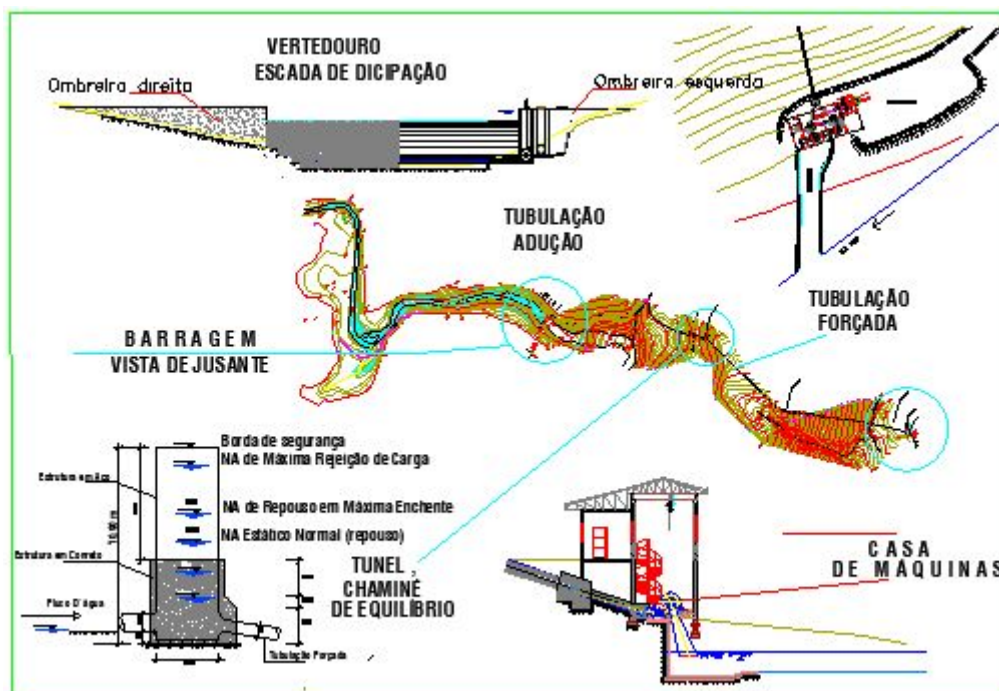
Tabela 08 - Cotas Principais do Projeto

NÍVEL D'ÁGUA	NA (m)
Piso da aprumada superior da tomada d'água	553,5
Vertedouro	552,2
Jusante tomada d'água	547,2
Chaminé de equilíbrio	446,9
Piso superior da casa de máquinas	444,6
Montante do canal de fuga	441,3
Piso inferior da casa de máquinas	438,2
Jusante do canal de fuga	433,3
Lâmina d'água máxima barragem	1,600

Fonte: Cerfox (2010)

Para caracterização da CGH Taipinha foram levantadas informações das características físicas de todas as instalações e elementos importantes, através de visitas no local, e informações técnicas e de projetos disponibilizadas pela empresa responsável. Foram buscadas as informações do reservatório e tomada d'água, barragem, escada de dissipação, válvula de fechamento, conduto de baixa pressão, chaminé de equilíbrio, conduto de alta pressão, juntas de dilatação, blocos de apoio e ancoragem, casa de máquinas, conjunto turbina/gerador e canal de fuga.

Figura 26 - Projeto CGH Taipinha



Fonte: Cerfox (2011)

3.2 Levantamento das informações de geração de energia

Para levantamento das informações de geração de energia foram utilizados relatórios de geração fornecidos pelos responsáveis, através de dados mensais de geração, em kWh, entre janeiro de 2012 e dezembro de 2019. A geração pretendida foi estabelecida conforme a capacidade instalada da usina, considerando as condições de disponibilidade hídrica e os dias de operação. Também, foram relatados eventos importantes que possam ter interferido na geração através da consulta de relatórios de operação disponibilizados na cooperativa proprietária (Cerfox). Após a análise dos dimensionamentos, avaliou-se a possibilidades de influência do sistema de adução nas recorrentes paradas na geração de energia elétrica.

3.3 Dimensionamento

3.3.1 Avaliação e dimensionamento da Tomada D'água

A avaliação da tomada d'água baseou-se em suas características, bem como, o cálculo da submersão da aresta superior da boca de entrada da tomada d'água. Quanto às características, observou-se a necessidade de utilização de grades de proteção, arraste de material suspenso e proteção contra perturbações ocasionadas pelas variações do nível d'água.

A avaliação da submersão visa evitar a formação de vórtices na estrutura. Para tanto, utilizou-se o modelo proposto por Gordon J. L (Eletrobras, 2000), apresentado na Equação 01.

$$S = C.v.d^{0,5} \quad (01)$$

Aqui, C é uma constante adimensional, sendo adotados valores de 0,7245 ou 0,5434 (para unidades métricas), para escoamento de aproximação assimétrico e simétrico, respectivamente; v é a velocidade de escoamento na comporta (m/s) e, d o diâmetro do conduto de adução (m).

3.3.2 Dimensionamento do Conduto de Baixa Pressão

Por meio do dimensionamento do conduto de baixa pressão, buscou-se calcular aspectos técnicos importantes na operação do sistema, comparando os resultados com as recomendações estabelecidas pelo Manual desenvolvido pela Eletrobras: Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.

O diâmetro mínimo da tubulação (D), foi estabelecido utilizando a equação de Scobey (Divatia., Chelvaraj e Murthy, 1974), apresentada na Equação 05. Onde (J) é a perda de carga unitária (m/km); (Ks) é chamado de coeficiente de Scobey, e representa o coeficiente de perda de carga de acordo com o material do conduto e das condições interiores, sendo que um valor recomendado para projetos é de 0,32 para todos os tipos de instalações; (V) é a velocidade do escoamento (m/s) e Dt o diâmetro interno da tubulação (cm). O valor de 410 é o fator de conversão para as unidades utilizadas.

$$J = 410.Ks.\frac{V^{1,9}}{D^{1,1}} \quad (02)$$

Para o cálculo da perda de carga localizada, utilizou a Equação 03, da definição de perda de carga unitária, conforme Netto e Fernandez (2015), onde a perda de carga é substituída pela queda bruta (Hb), sendo que, a queda bruta a ser considerada é apenas a queda que incide no conduto de baixa pressão.

$$J = \frac{Hb}{100.L_{cf}} \quad (03)$$

Para calcular a velocidade do escoamento, utilizamos a equação da continuidade (CHADWICK, MORFETT e BORTHWICK, 2017), expressa em função da velocidade, apresentada na Equação 04.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (04)$$

Substituindo as Equações (03) e (04) na Equação (05), chega-se na Equação 05 para calcular o diâmetro mínimo da tubulação.

$$D = 341,278.Q^{0,388}.(Ks.\frac{L}{H_b})^{0,204} \quad (05)$$

Para tubulações de baixa pressão, como é o caso dos condutos em questão, recomenda-se uma espessura mínima de parede, pois qualquer defeito de laminação ou corrosão compromete a espessura e, se forem muito finas, dificultam a solda e influenciam no transporte (DIVATIA, CHELVARAJ e MURTHY, 1974). A expressão para cálculo da espessura mínima está apresentada na Equação 06.

$$e = \frac{D+500}{400} \quad (06)$$

Os valores encontrados no dimensionamento serão comparados com características atuais do sistema, sendo avaliados os impactos positivos e negativos quando estes valores apresentarem variações.

3.3.3 Dimensionamento da Chaminé de Equilíbrio

O chaminé de equilíbrio, tem por objetivo amortecer variações de pressão que se propagam pelo conduto forçado, decorrentes principalmente, do fechamento rápido da turbina e, manter o nível de água para alimentar o conduto forçado quando da abertura da turbina, restabelecendo o fluxo contínuo (ELETROBRAS, 2000).

A instalação da chaminé de equilíbrio é definida pela relação apresentada pela Equação 07, onde (La) é o comprimento total da tubulação e (H) a queda do sistema, sendo que valores igual ou menores que 5 (cinco) dispensam a instalação.

$$\frac{La}{H} \leq 5 \quad (07)$$

Para definição da velocidade de escoamento, compara-se as características do conduto com o tempo, relacionado o tempo de aceleração e desaceleração que a água leva no período de regime entre o início e o escoamento, através das forças oriundo da pressão e da inércia, considerando uma aceleração média.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (08)$$

Eletrabras (2000) estabelece como critério para instalação da chaminé de equilíbrio a constante de aceleração do escoamento no conduto forçado (Th), que é definida pela Equação 09, relacionando a velocidade do escoamento no conduto forçado (V_{cf}), o comprimento do conduto forçado (L_{cf}), a carga bruta (H_b), aceleração da gravidade (g). A instalação da chaminé de equilíbrio deve ocorrer sempre que o tempo de aceleração for maior do que seis segundos. Para tempo de aceleração menor que 3s ($Th < 3$ s) não há necessidade de instalação de chaminé de equilíbrio.

$$Th = \frac{V_{cf} \cdot L_{cf}}{g \cdot H_b} \quad (09)$$

O dimensionamento da seção transversal ($A_{c_{min}}$) da chaminé de equilíbrio, área interna mínima, foi calculado pela fórmula de Thoma (Jakobsson, 2019), conforme Equação 10, onde v é a velocidade do escoamento no conduto forçado; L_{ta} é o comprimento do conduto forçado (m); A_{ta} é a área da seção transversal do conduto forçado (m^2); H_{min} é a queda bruta mínima (m); h_{ta} é a perda de carga total no conduto forçado (m) e; g é aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m}^2/\text{s}$).

$$A_c = \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{L_{ta} A_{ta}}{(H_{min} - h_{ta}) h_{ta}} \quad (10)$$

A altura da chaminé de equilíbrio (H_c) foi determinada em função da oscilação do nível d'água, que é estabelecida pela Equação 11, sendo que as perdas de carga no sistema

adutor são desprezadas. Nestas condições a elevação (Y_e) do nível d'água estático é igual à depleção (Y_d) do nível d'água estático mínimo (ELETROBRAS, 2000).

$$Y_e = Y_d = v \frac{\sqrt{A_{ta} \cdot L_{ta}}}{g \cdot A_c} \quad (11)$$

Quando as perdas no sistema de adução são consideradas, a elevação máxima (Y_E) é dado pela multiplicação do fator de perda de carga devido ao efeito do golpe de aríete (h_s) e pela elevação máxima do nível estático (Y_e). O fator z_E é dado pela Equação 12, onde k é a perda de carga relativa, que é dada pela razão entre a perda de carga no sistema de adução (h_{ta}) e a elevação máxima do nível estático (Y_e).

$$z_e = 1 - \frac{2}{3}k + \frac{1}{9}k^2 \quad (12)$$

Para o cálculo da depleção (Y_d) é necessário verificar quais das duas situações a seguir, é a mais desfavorável. Na primeira situação, considera-se depleção consecutiva à elevação máxima, em função do fechamento total da turbina, neste caso utiliza-se a Equação 13, onde o coeficiente z_d é obtido a partir do gráfico da Figura 27, onde o coeficiente k' é calculado pela Equação 14.

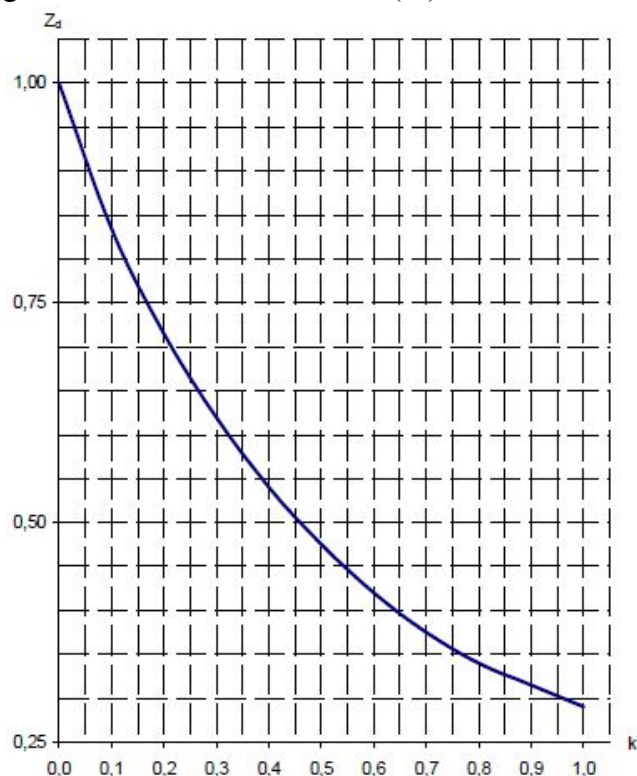
$$Y_E = z_e \cdot Y_e \quad (13)$$

$$k' = \frac{h'_{ta}}{Y_d} = \frac{h'_{ta}}{Y_e} \quad (14)$$

Na segunda situação, para abertura parcial da turbina de 50% a 100%, o cálculo da depleção (Y'_D) é realizado pela Equação 15, onde o coeficiente z'_d é obtido a partir do gráfico da Figura 27, e o coeficiente k' é calculado pela Equação 14.

$$Y'_D = z'_d Y'_d \quad (15)$$

Figura 27 - Gráfico Curva $Z_d = f(k')$



Fonte: Eletrobras (2000).

A altura da chaminé de Equilíbrio (H_c) será definido pela Equação 16.

$$H_c = Y_E + y_E + (Y_D \text{ ou } Y'_D) + y_D + Y_R \quad (16)$$

Como segurança, a Eletrobras (2000), sugere, que a altura de elevação e da depleção (y_E e y_D) tenham um acréscimo de 1,0 m.

Os valores calculados foram comparados com a situação implantada na CGH Taipinha, verificando se as instalações atendem as condições mínimas exigidas pela Eletrobras (2000), e os possíveis impactos das variações encontradas na operação do sistema.

3.3.4 Dimensionamento do Conduto Forçado

Para o dimensionamento do conduto forçado, seguiu-se metodologia proposta pela Eletrobras (2000), que estabelece que o conduto deve possuir diâmetro constante ao longo de

todo seu comprimento. Partindo-se da vazão de projeto (Q) e da queda total (H_t), que é igual a queda bruta mais 20% em função da sobrepressão relativo ao golpe de ariete (H_t = 1,2.H_b), encontra-se o diâmetro econômico (D_e) através da fórmula de Bondschu (Equação 17).

$$D_e = 123,7 \cdot \sqrt[7]{\frac{Q^3}{H_t}} \quad (17)$$

Utilizando-se a equação da Continuidade, determina-se a velocidade máxima admissível para cada tipo de tubulação, conforme Tabela 9 (ELETROBRAS, 2000). Em seguida, calcula-se as perdas de carga unitárias (J), em função do atrito, através da Equação 19. Desprezando assim, as perdas de carga localizadas devido às tubulação possuir diâmetro e comprimentos elevados, sendo que estas perdas são pequenas em relação a perda de carga por atrito (NETTO e FERNÁNDEZ, 2015).

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (18)$$

Para o cálculo das perda de carga unitária (J) em (m/km), usa-se o coeficiente de Scobey (K_s) definido de acordo com o tipo de material do conduto e das condições interiores, sendo o valor recomendado para conduto de aço de 0,32 para todos os tipos de instalações. Com a velocidade (V) conhecida na Equação 18, verifica-se a velocidade máxima de escoamento para cada tubulação conforme Tabela 9, e para determinar o diâmetro interno (D_t) da tubulação (cm), usa-se um valor de fator de conversão de 410, e um diâmetro interno do conduto (D_i), estabelecido pela equação de Scobey (DIVATIA, CHELVARAJ e MURTHY, 1974), conforme definido pela Equação 17.

$$J = 410 \cdot K_s \cdot \frac{V^{1,9}}{D^{1,1}} \quad (19)$$

Tabela 9 - Relação de velocidade máxima por tipo de material

MATERIAL	V _{max} admissível (m/s)
Aço	5,0
Concreto	3,0

Fonte: Eletrobras (2000).

3.4 Variação de Pressão - Golpe de Ariete

Para análise do golpe de ariete que corresponde ao fenômeno causada pela variação de pressão e de velocidade da água pela alteração das condições de escoamento, ou seja, nas condições que o fluxo deixa de ser permanente, e variam ao longo do tempo. Logo a energia resultante das variações convertem-se em trabalho de compressão do líquido e, principalmente, de deformação das paredes dos encanamentos e demais singularidades da canalização, ocorrendo também nas máquinas hidráulicas, como a turbina. logo a pressão máxima normal para funcionamento do conduto forçado é definida como a soma da pressão hidrostática e a sobrepressão decorrente do golpe de ariete (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Sendo assim, para determinação da espessura do conduto forçado, deve-se basear nas variações de energia ocasionadas pelo golpe de ariete, positivas (sobrepressões) ou negativas (depressões). Essas variações são estimadas pelo Método de Allievi para condutos com uniformidade de espessura de parede e de diâmetro interno.

A velocidade da onda de pressão, é calculada através da Equação 20, considerando o diâmetro interno do conduto (D_i), a espessura do conduto (e) e, o coeficiente (k) que depende do material do conduto conforme a Tabela 10 (ELETROBRAS, 2000).

$$v_p = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D_i}{e}}} \quad (20)$$

Tabela 10 - Coeficiente (k)

CONDUTO	k
Aço	0,50
Ferro fundido	1,00
Chumbo	5,00
Madeira	10,00
Concreto	5,00

Fonte: Eletrobras (2000).

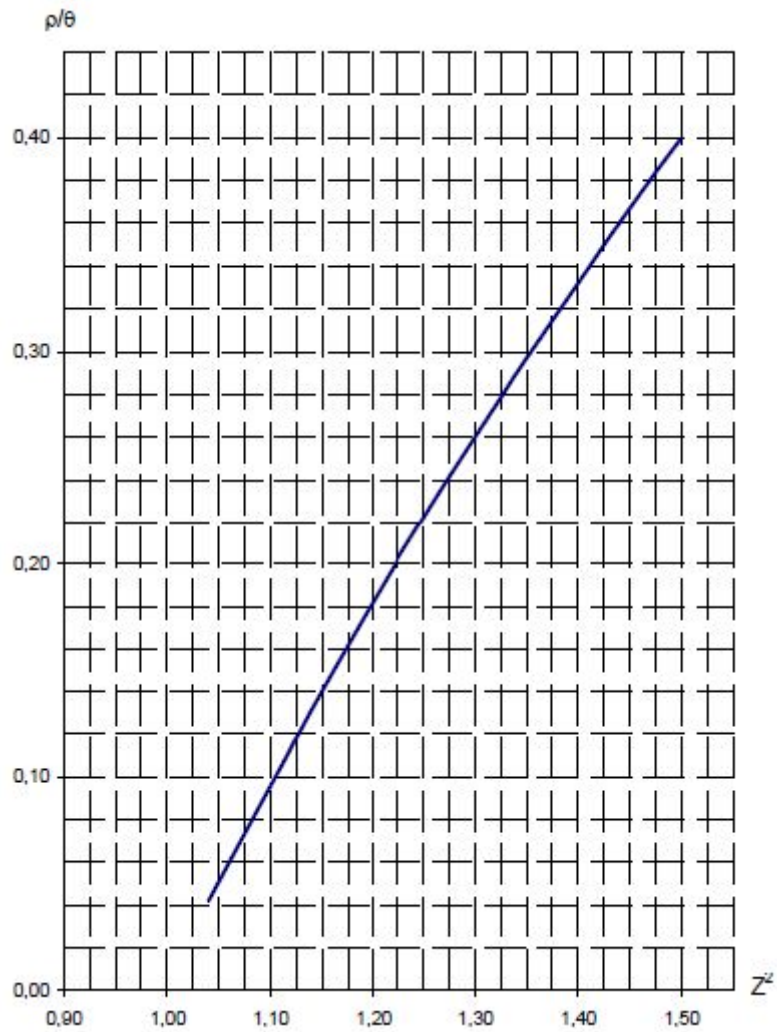
Quando não há informações fornecidas pelo fabricante da turbina, adota-se os seguintes tempos: $t = 6,0$ s em condutos curtos com comprimento (L) menor ou igual a três vezes a queda bruta ($3.H_b$) e $t = 10$ s para comprimento (L) maior ou igual a três vezes a queda bruta ($3.H_b$).

Para cálculo da constante da linha (ρ) e do número de intervalos ($2.L/v_p$) contidos no tempo de fechamento da turbina (θ) utilizam-se as Equações 21 e 22, onde (V_p) é a celeridade da onda de pressão (m/s), (V) a velocidade do escoamento (m/s), (g) a aceleração da gravidade (m/s^2), (H_b) a queda bruta (m), (t) o tempo de fechamento do dispositivo de fechamento da turbina (s) e, (L) o comprimento do conduto (m).

$$\rho = \frac{v_p V}{2gH_b} \quad (21)$$

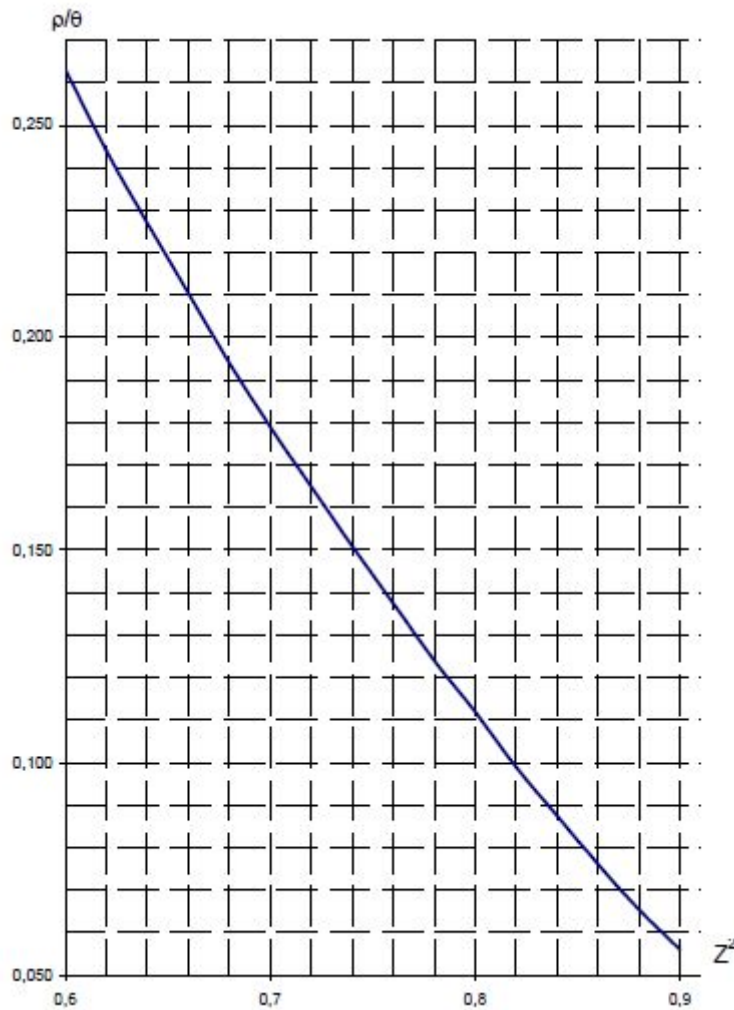
$$\theta = \frac{v_p t}{2L_{cf}} \quad (22)$$

Figura 28 - Curva Z^2 em relação a ρ e θ para sobrepressão



Fonte: Eletrobras (2000).

Figura 29 - Curva Z^2 em relação a ρ e θ para depressão



Fonte: Eletrobrás (2000).

Para cálculo da sobrepressão ou depressão (h_s) utiliza-se a Equação 23, onde o limite máximo é de 35% da queda bruta ($0,35.H_b$). Este método é conhecido como Método de Allievi simplificado e considera, além da queda bruta, (Z^2) que é um parâmetro obtido através da curva de sobrepressão e depressão, em função da constante da linha (ρ) e do número de intervalos ($2.L/v_p$) contidos no tempo de fechamento da turbina (θ) conforme gráfico demonstrado na Figura 27 (ELETROBRAS, 2000).

$$h_s = (z^2 - 1) . H_b \quad (23)$$

Assim, após os cálculos da sobrepressão e depressão, podemos seguir com o cálculo da espessura mínima para os condutos forçados, avaliando então, se a espessura dos condutos instalados possuem capacidade de suportar as variações de energia provenientes do golpe de ariete. Para tubulações de aço, considera-se 1,0 mm de sobre-espessura (e_s) como segurança contra a corrosão, conforme Equação 24 (ELETROBRAS, 2000).

$$e = \frac{P_t D}{2\sigma_f K_f} + e_s \quad (24)$$

3.4.1 Espessura do Conduto Forçado

Para determinação da espessura da parede do conduto forçado adotou-se metodologia semelhante à já apresentada para o cálculo da espessura da tubulação nos condutos de baixa pressão. Porém, para o cálculo da pressão total interna máxima para o conduto forçado, calculou-se, agora, considerando o golpe de ariete, ou seja, adiciona-se a pressão hidrostática (P_i) com a sobrepressão (h_s), observando o limite máximo de 20% da queda bruta ($0,2.H_b$), obtendo-se a pressão total (P_t).

$$H_l = H_b - h_t \quad (25)$$

$$P_i = H_l + h_s \quad (26)$$

$$P_t = P_i + h_s \quad (27)$$

Conforme Divatia, Chelvaraj e Murthy (1974), a espessura mínima para condutos deve ser adotada conforme relação apresentada na Equação 28, para evitar danos às mesmas, considerando o diâmetro em mm.

$$e \geq \frac{(D+500)}{400} \quad (28)$$

3.4.2 Avaliação da espessura em relação à pressão externa

Quando os esvaziamento dos condutos é realizado sem os devidos cuidados pode-se provocar o colapso das paredes da tubulação. Isto ocorre, devido a depressão parcial ou total no sistema, que gera um queda de pressão (tipo vácuo), que pode gerar deformação como afundamentos na chapa (DIVATIA, CHELVARAJ e MURTHY, 1974).

Conforme Eletrobras (2000) para o cálculo da pressão de colapso (P_c) em tubulações de chapas de aço, utiliza-se a Equação 29, (e) é espessura da chapa do conduto; D o diâmetro interno. Considerando as características do aço, calculado pela Equação, reporta-se que, caso a espessura da chapa seja maior que 0,6% do diâmetro interno do conduto, a rigidez da chapa é suficiente para sustentar o vácuo interno.

$$P_c = 882.500 \left(\frac{e}{D} \right)^3 \quad (29)$$

Assim, avaliou-se a possibilidade de colapso da tubulação em relação a espessura do conduto forçado e a ação de pressão externa em função de algum esvaziamento abrupto do sistema.

3.4.3 Avaliação do tempo crítico de fechamento

A avaliação do tempo crítico de fechamento (T_c) foi realizado para avaliar a onda de pressão gerada pelo fechamento da turbina. A onda de pressão caracteriza-se pela sua celeridade, que indica a velocidade de propagação do som no líquido contido no conduto e pela sua fase (ou tempo crítico), que é o tempo necessário para que a onda retorne a sua origem (ORTIZ, 2014).

O tempo crítico (T_c) foi calculado pela Equação 30, onde (L) representa o comprimento do conduto e (α) é a celeridade da onda (que indica a velocidade do som em um líquido). A celeridade (α) é definida pela Equação 31, onde (k) é o módulo de elasticidade do líquido, (ρ) é a massa específica da água (1000 kg/m³), (E) o módulo de elasticidade do material aço, (D) o diâmetro da tubulação (m), e “ e ” a espessura do conduto (m).

$$T_c = \frac{2L}{\alpha} \quad (30)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{k} + \frac{D}{E \cdot e} \right)}} \quad (31)$$

A avaliação do tempo de fechamento indicou o tempo mínimo para fechamento de turbina para prevenção do choque sônico.

3.5 Dimensionamento do Tubo de Aeração

O tubo de aeração tem como função equilibrar as pressões internas e externas, com o objetivo de evitar o colapso das tubulações, e é instalado à jusante da comporta de tomada d'água. Constitui-se, em um tubo para entrada de ar, e apresenta-se como uma solução econômica, tendo em vista, que outras alternativas, como reforço dos anéis das tubulações ou aumento da espessura da tubulação, impactam significativamente nos custos de instalação.

Assim, para o cálculo do diâmetro do tubo de aeração, considera-se a pressão de colapso (P_c), onde, quando $P_c < 0,49 \text{ kgf/cm}^2$ utiliza-se a Equação 32 e, quando $P_c > 0,49 \text{ kgf/cm}^2$ utiliza-se a Equação 33 (ELETROBRAS, 2000).

$$d = 7,47 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{P_c}}} \quad (32)$$

$$d = 8,94 \cdot \sqrt{Q} \quad (33)$$

Após o cálculo do diâmetro mínimo para o tubo de aeração, comparou-se com o diâmetro do tubo instalado na CGH Taipinha com o objetivo de avaliar a possibilidade de ocorrência de colapso nas tubulações.

3.6 Blocos de apoio (selas) para condutos de baixa pressão

As tubulações de aço devem ser apoiadas sobre blocos de apoio ou selas, que têm como função sustentar a tubulação e permitir o deslizamento livre sobre eles. Para o dimensionamento do espaçamento entre os blocos, levou-se em consideração a altura (A) do bloco, a largura da base (B) e o comprimento da base (C), conforme condições da Equação

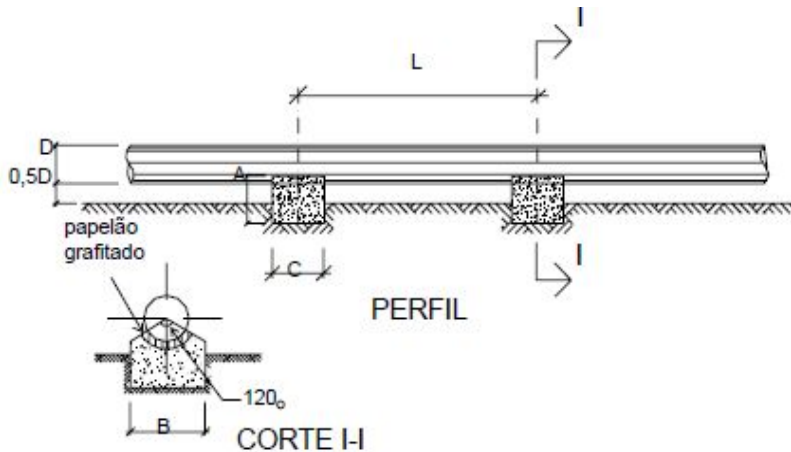
34, levando em consideração qualquer tipo de solo com tensão admissível de compressão de 1,5kgf/cm².

$$(A=1,2.D) \quad (B = 1,6.D) \quad (C=1,7.D) \quad (34)$$

A Figura 30, apresenta representação esquemática das dimensões dos espaçamentos entre os blocos de apoio. A condição de espaçamento entre os blocos devem respeitar a relação apresentada na Equação 35, onde (L) é o espaçamento máximo entre os blocos e (D) o diâmetro do conduto (ELETROBRAS, 2000).

$$L \leq 6 D \leq 5m \quad (35)$$

Figura 30- Perfil da disposição dos blocos para tubulação de Baixa Pressão em aço



Fonte: Eletrobras (2000).

3.7 Blocos de apoio (selas) para condutos de alta pressão

Calcula-se as seções das selas pela mesma fórmula utilizada no sistema de baixa pressão vista na Equação 34, onde encontra-se a altura (A) do bloco, largura da base (B) e o comprimento (C). Levando em consideração qualquer tipo de solo com tensão admissível de compressão de 1,5kgf/cm².

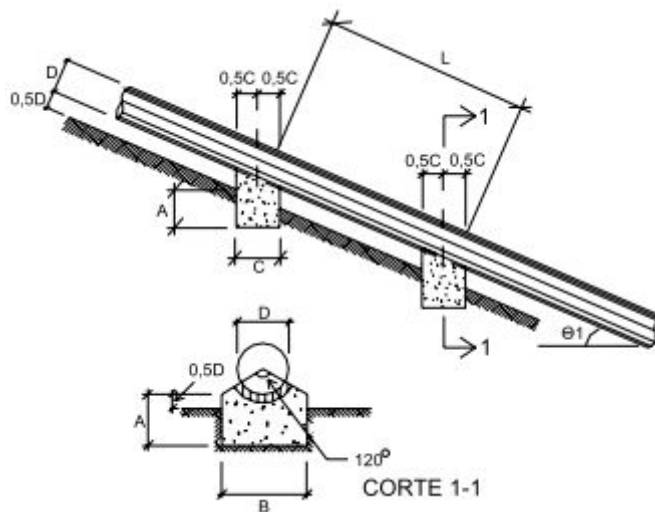
Para calcular o espaçamento entre blocos utiliza-se a Equação 36, onde, considera as tubulações, como uma viga bi engastada, o qual irá ser calculado pela Equação 36, que define as cargas distribuídas ao longo da tubulação (p), e a distância entre os eixos dos blocos (Ls), bem como a espessura da parede da tubulação (e) e o diâmetro da tubulação (d), para um

peso específico da água (γ_a) de (1000 kgf/m³) e peso específico da tubulação (γ_t) (7850,1 kgf/m³) conforme (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

$$p = \gamma_a \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 + \gamma_t \cdot \pi \cdot e \cdot (D + e) \quad (36)$$

$$L_s = 182,61 \cdot \sqrt[3]{\frac{(D+2 \cdot e)^4 - D^4}{p}} \quad (37)$$

Figura 31- Perfil da disposição dos blocos para tubulação de aço



Fonte: Eletrobras (2000).

Com o cálculo da distância máxima entre os blocos, pode-se avaliar se os blocos de apoio instalados na CGH Taipinha estão instalados a distâncias adequadas, não sofrendo esforços que possam vir a prejudicar a estrutura dos condutos.

3.8 Blocos de ancoragem

Os blocos de ancoragem são responsáveis por absorver as forças longitudinais aplicadas nos condutos. Os blocos de ancoragem devem ser instalados sempre que há mudança de direção, ou pelo menos no início e no fim do conduto, nunca ultrapassando uma distância máxima de 70 metros (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Para o dimensionamento dos blocos de ancoragem, seguiu-se metodologia proposta por Souza (1999). A distância entre os blocos de ancoragem (L_{af}) foi calculada utilizando a

Equação 38, considerando a dilatação linear da juntas (Δa) de 2 cm, em metros, o coeficiente de dilatação linear do conduto ($\alpha = 1,2.10^{-5} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$ para o aço) e a diferença máxima de temperatura permitida para a parede do conduto (Δt), em 30 °C, segue-se a relação encontrado na tabela proposto por Souza, Santos e Bortoni (2009).

$$L_{af} = \frac{\Delta a}{\alpha \cdot \Delta t} \quad (38)$$

O dimensionamento das dimensões B expressas na Figura 32, a, foram realizadas utilizando as Equações 39 a 43. Para a dimensão E, expressa na Figura 32, b, utilizou-se a Equação 39.

$$B = 2.D \quad (39)$$

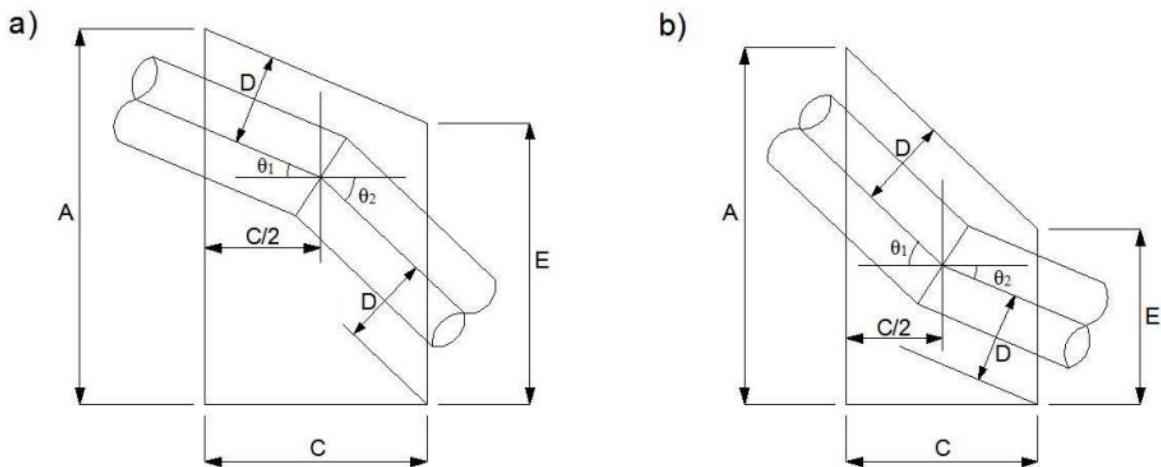
$$C = 3.D \quad (40)$$

$$A = \left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{1}{\cos \theta_2} \right) . D + (tg \theta_1 + tg \theta_2) . \frac{C}{2} \quad (41)$$

$$E = \left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{1}{\cos \theta_2} \right) . D + (tg \theta_1 - tg \theta_2) . \frac{C}{2} \quad (42)$$

$$E = \frac{2.D}{\cos \theta_2} \quad (43)$$

Figura 32 - Perfil da disposição dos blocos em curvas



Fonte: Souza, Santos e Bortoni, 2009.

As dimensões calculadas, e as distâncias máximas, serão comparadas com os valores dos blocos de ancoragem e distâncias encontrados no sistema de adução da CGH Taipinha, bem como, avaliado a influência, caso existam divergências, na operação.

Também, utiliza-se fórmula simplificada desprezando, esforços solicitantes, onde considera-se Altura $A > 2.D$, Largura, $B = 3.D$ comprimento $C = 4.D$, e espaçamento entre os Blocos $L \leq 30m$, onde a distância máxima entre os blocos de ancoragem é de 30 metros, conforme Eletrobras (2000).

3.9 Avaliação do comportamento hidráulico

Após o dimensionamento do sistema e avaliação dos valores encontrados, serão avaliados os efeitos sobre a operação do sistema. Portanto, serão avaliadas as perdas de carga no conduto de baixa e alta pressão, sendo consideradas as perdas distribuídas ou por atrito ao longo do escoamento e, as localizadas devido às singularidades presentes no conduto, como na grade da tomada d'água (h_g) entrada da adução (h_e), reduções (h_r), curvas (h_c) e bifurcações (h_b), etc, seguindo metodologia proposta por Eletrobras (2000).

Também será avaliado o valor das perdas de cargas (C_p) nos condutos seguindo metodologia proposta por Ortiz (2014). O valor de (C_p) foi determinado para tubulação atual e para tubulação com diâmetro econômico calculado neste trabalho, com o intuito de avaliar as perdas de energia. Não foram considerados amortizações e depreciações de equipamentos, apenas o cálculo da quantidade de energia gerada relacionando com a produzida pela cooperativa responsável pela CGH Taipinha.

3.10 Determinação das perdas de carga

No sistema adutor a montante da chaminé de equilíbrio obtém-se as perdas de carga:

- a) Perda de carga inicial na tomada d'água (h_i) $k_i = 0,10$

$$h_i = k_i \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (44)$$

- b) Perda de carga nas grades da tomada d'água (h_g) $k_g = 1,79$; Espessura das barras ($e_1 = 19,5mm$); Distância entre barras ($e_2 = 10cm$); Inclinação da grade (75°).

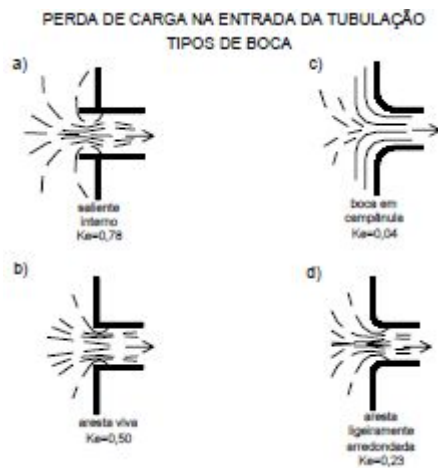
$$h_g = K_g \cdot \left(\frac{e_1}{e_2} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot \sin 75^\circ \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (45)$$

c) Perda de carga na entrada da tubulação adutora ($h_e=0,23$)

A perda de carga na entrada do conduto (h_e) foi calculada utilizando a Equação 46, onde v é a velocidade média imediatamente à jusante da entrada em m/s, k_e é o coeficiente variável em função da forma da boca do conduto (adotado k_e igual 0,23 para aresta ligeiramente arredondada), sendo g a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$).

$$h_e = k_e \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (46)$$

Figura 33 - Perdas de carga na entrada da tubulação



Fonte: Eletrobras (2000).

d) Perda de carga por atrito na tubulação adutora (h_a). Para paredes lisas $k_a = 0,32$

$$h_a = j' L = 410 \times k_a \frac{v^{1,9}}{D^{1,1}} L_c \quad (47)$$

e) Perda de carga nas curvas acentuadas do conduto (h_c) $k_c = 0,06$ ângulo de 15° a 30°
 (h_c) $k_c = 0,06$ ângulo de 30° a 45° de deflexão.

A perda de carga nas curvas foi calculada em função do ângulo de deflexão, ou seja, o ângulo que indica a mudança de direção entre as partes retilíneas de montante e jusante da curva. Este ângulo resulta em um coeficiente k_c , que está apresentado na Tabela 11. A Equação 48 é utilizada para calcular as perdas de carga em curvas, onde (V) é a velocidade média do conduto em m/s, k_c o coeficiente já citado, e g a aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

$$h_c = k_c \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (48)$$

Tabela 11 - Coeficiente (k_c)

Ângulo de Deflexão	k_c
< 10°	0
10° a 15°	0,03
15° a 30°	0,06
30° a 45°	0,09
> 45°	0,13

Fonte: Eletrobrás (2000).

$$h_c = \frac{v^2}{2 \cdot g} \times 3 \quad \text{calculado curva (1°- 45), (2°-32),(3°-15),(4°45)} \quad (49)$$

A perda de carga na bifurcação foi calculada utilizando a Equação 50, onde k_b é o coeficiente de perda de carga que é função das áreas das tubulações de montante e jusante à bifurcação. Ou seja, considera-se para o cálculo a área da tubulação de entrada na bifurcação e as áreas dos braços do conduto após a bifurcação, bem como, a deflexão de cada um dos braços em relação ao conduto principal. Considerando uma deflexão de 30° e relação entre as áreas de entrada e saída 0,58, utilizou-se $k_b = 1,35$ (NETTO e FERNÁNDEZ, 2015)

$$h_b = k_b \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (50)$$

g) Perda nas Reduções Cônicas (hr)

A perda de carga nas reduções cônicas é calculada utilizando-se a expressão a seguir, onde: velocidade média no conduto, a jusante da redução (m/s); coeficiente de perda de carga nas reduções cônicas, que varia de 0,005 a 0,010.

$$h_r = k_r \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (51)$$

f) Total de perda de carga

$$h_t = h_i + h_g + h_e + h_a + h_c + H_b + h_r \quad (52)$$

4. RESULTADOS

4.1 Descrição da Área de Estudos

Abaixo serão demonstrados as características da CGH Taipinha

4.1.1 Reservatório/Tomada d'água

A CGH Taipinha possui um reservatório, com uma área de alague de aproximadamente 23000 m² e uma barragem a fio d'água, com arranjo por derivação com 83m entre ombreiras laterais e vertedouro, e um barramento de 5m de altura e lâmina d'água de 1,60m. Com a tomada d'água encaixada na margem esquerda do vertedouro, equipada com limpa grades e comporta que funciona por acionamento de pistões hidráulicos. Faz a captação da água do rio para alimentação das turbinas e cumpre também a finalidade de promover a transição do escoamento para o tubo de adução. É constituída de uma soleira seguido de uma câmara de concreto, onde acomoda a estrutura da comporta, que tem uma dimensão de 1,8 x 1,0 m. Possui uma área de passagem hidráulica na grade 1,50 x 1,68 m, sendo que, nesta estrutura em paralelo com a comporta está instalada a 50 cm da base a montante do barramento e a descarga de fundo, usada para dar vazão sanitária ao rio. Ombreiras de concreto nas extremidades, que acompanha o alinhamento da barragem, que se apresenta na cota máxima no patamar mais elevado (553,5 m), tendo uma largura da sua crista de 17 m, conforme pode ser observado na Figura 34.

4.1.2 Barragem - Escada de dissipação

Possui uma escada de dissipação de energia devido à razoável altura da barragem, previsto para proteger do desgaste da rocha no ponto de incidência do jato de despejo.

Figura 34 – Escada de dissipação



Fonte: Cerfox (2019).

4.1.3 Válvula de fechamento de barragem

A válvula de fechamento da barragem é responsável pelo estaqueamento da água que desce pelos condutos. Localiza-se a poucos metros da barragem, e funciona como bloqueio da passagem da água no sistema hidráulico. Também usada, como dispositivo de segurança, para interromper o fluxo hidráulico quando da necessidade de realizar manutenções, seu travamento não permite o funcionamento da usina. É um equipamento mecânico comandado por um sistema de automação, que passa constantemente por inspeções visuais, afins de verificar seu estado de conservação como: corrosão, vazamento e funcionando correto.

4.1.4 Conduto de baixa pressão

O sistema de adução em baixa pressão é formado por tubos de aço de 900 mm de diâmetro com espessura uniforme, no decorrer do conduto, com uma extensão de 450 m.

Tem uma inclinação de fundo, em direção à jusante, de 0,29 m, onde permite o escoamento da água até a chaminé de equilíbrio, mantendo a carga líquida regulada durante as operações de abertura e fechamento da comporta.

Na sua construção inicial, para se ter uma economia de material, foi utilizado uma tubulação mista para transportar a água em baixa pressão até a chaminé de equilíbrio, usando em um trecho inicial, 250 m de tubo em aço, seguido de 200 m de comprimento com tubulação de concreto que conecta-se ao chaminé de equilíbrio. Devido as diferentes cotas do terreno foi escavado nas áreas mais elevadas e construído estruturas metálicas treliçadas sobre a travessia de um córrego, conforme Figura 35, para passagem dos tubos.

A partir do segundo ano de operação, a CGH Taipinha, começou apresentar problemas no processo de geração em virtude do desequilíbrio e oscilação das turbinas hidráulicas, e perdas de vazão à jusante, problemas estes que ocorreram possivelmente em virtude das oscilações nas pressões hidrostáticas do conduto de carga e avarias nas máquinas, devido ao transporte de fragmentos de concreto levados até as máquinas. E Diante disso, foram substituídos todos os tubos de concreto devido apresentar grandes vazamentos nos encaixes de ligação. Situação a ser considerada, na avaliação final deste estudo, no que trata, das manutenções realizadas nos condutos, e as perdas de energia devido ao tempo de interrupções de geração da CGH.

Figura 35 - Conduto de baixa pressão



Fonte: Autor (2019).

4.1.5 Chaminé de Equilíbrio

A chaminé de equilíbrio apresenta-se com formato cilíndrico, com uma altura total de 10,90 m, com base de concreto em 4,60 m, seguido de um tubo metálico de 6,30 m, com um diâmetro de 3,5 m conforme Figura 36. Está conectado com o conduto de baixa e alta pressão, onde promove a transição do escoamento livre para a tubulação forçada. Tem uma superfície aberta protegida por uma tela, para impedir que qualquer corpo estranho (sujeira) entre dentro do sistema de adução, e sejam levados até as turbinas hidráulicas. Serve como um tanque de acúmulo de água, o qual leva por gravidade até a casa de máquinas. Tem a finalidade de absorver as ondas produzidas pela sobrepressão na tubulação produzidas pelos efeitos do golpe de aríete. Entretanto, observou-se inicialmente, que ele não está cumprindo seu papel, de aliviar as cargas nas tubulações, principalmente durante as operações de abertura e fechamento das válvulas. Devido ao seu posicionamento, pois está a uma distância maior que a recomendada, para este dimensionamento.

Figura 36- Chaminé de equilíbrio



Fonte: Autor (2019).

4.1.6 Conduto de alta pressão

Os condutos de alta pressão, possuem uma extensão inclinada que acompanham o desnível do terreno partindo do chaminé de equilíbrio até um grande bloco, que fica próximo da casa de máquinas. Conforme apresentados na Figura 37, são tubos metálicos que estão divididos em três trechos com diâmetros diferentes, os quais vão reduzindo sequencialmente, sendo 340 m com 80 cm, 155 m com 75 cm e 125 m com 70 cm. Onde divide-se em uma bifurcação em Y, com dois trechos 5,5 m com 60 cm, seguidos de 2m com 45cm de diâmetro conectados as válvulas borboletas. Somado-se um comprimento linear do conduto de alta pressão de 627,5m.

Os condutos forçados estão assentados sobre berços selas de concreto que estão dispostos de maneira distribuída e ancorados em blocos de concreto armado, no ponto intermediário, de maior inflexão ou quando houver mudança de direção.

Figura 37 – Condutos de alta pressão



Fonte: Autor (2019)

4.1.7 Juntas de Dilatação

No circuito hidráulico de adução da CGH Taipinha, existem vinte e cinco juntas metálicas de dilatação instaladas com estrutura rígida, em formato de bolsa que são soldados aos condutos em uma distância, estipulada em projeto, de aproximadamente 40m, localizada

no lado inferior da inclinação e próxima ao bloco de ancoragem, onde absorve as primeiras vibrações produzidas no conduto, atuando como dispositivos de segurança para o sistema de adução. Conforme (Sousa, Santos e Bortoni, 2009), essas vibrações acontecem em diferentes direções. Porém, não estão resistindo aos esforços de sobrepressão interna (efeitos do golpe de aríete), vindo a ocorrer deformações nos elementos como: esmagamento, estufamento, fissuras e demais patologias nos condutos de carga.

Figura 38 – Juntas de dilatação



Fonte: Autor (2019).

4.1.8 Blocos de Apoio

Os blocos de apoio ou selas são estruturas de concreto, construídas sobre rochas e solo firme, onde possuem um chanfro circular que acomoda o conduto com encaixe conforme a espessura do tubo, a qual permite a movimentação das tubulações quando necessário. Possuem uma largura de 50 cm, e a altura varia conforme as condições do terreno. Estão alinhadas entre si, com uma inclinação que acompanha o desnível linear onde são encaixados os tubos. Entre a tubulação e o bloco utilizam-se papelão grafitado, com a finalidade de absorver as vibrações e permitir seu deslizamento conforme representado na Figura 39.

Figura 39 – Blocos de Apoio



Fonte: Autor (2019).

4.1.9 Blocos de Ancoragem

Os blocos de ancoragem são estruturas rígidas mais robustas com melhor sondagem, que as estruturas de apoio, onde a tubulação encontra-se grampeada na armadura dos blocos, presa junto a estrutura, a fim de impedir a movimentação da tubulação. Conforme apresenta-se na Figura 40, onde foram necessárias reforços estruturais, a fim de proteger os condutos de carga.

Figura 40 – Blocos de Ancoragem



Fonte: Autor (2019).

4.2 Casa de máquinas

A casa de máquinas é uma infraestrutura que abriga as turbinas, grupos geradores com seus acessórios, painel de comando e medição, painel de automação e painel de serviços auxiliares, onde é realizado a operação da PCH, cubículo de baixa tensão, área de serviços e instalações sanitárias. Possui uma área útil de 75 m², e está posicionada em dois níveis, de modo que somente a turbina com os acessórios fica na parte mais baixa da casa de máquinas. Esta possui uma área de 43m², por função da posição inclinada dos eixos das turbinas, o que permite uma melhor acomodação das máquinas neste espaço.

O pavimento superior possui uma área total de 32 m², suficiente para acomodar os equipamentos de controle e operação, por sua vez, abriga todos os equipamentos restantes, disposta em um nível superior ao de alcance de enchente.

Figura 41 - Casa de máquinas (CGH Taipinha)



Fonte: Autor (2019).

4.2.1 Conjunto turbinas/gerador

A entrada de água na turbina é controlada por uma válvula borboleta comandada por um sistema hidráulico com contrapeso. Todo o sistema é supervisionado por sensores que levam as informações para os painéis de controle que se localiza na casa de máquinas.

Possui duas turbinas do tipo Francis espiral com perfis hidráulicos otimizados, sua potência no eixo de cada turbina pode chegar a 730 cavalos com uma rotação de 1200 rpm. que tem a função de converter a energia mecânica contida na queda d'água em trabalho.

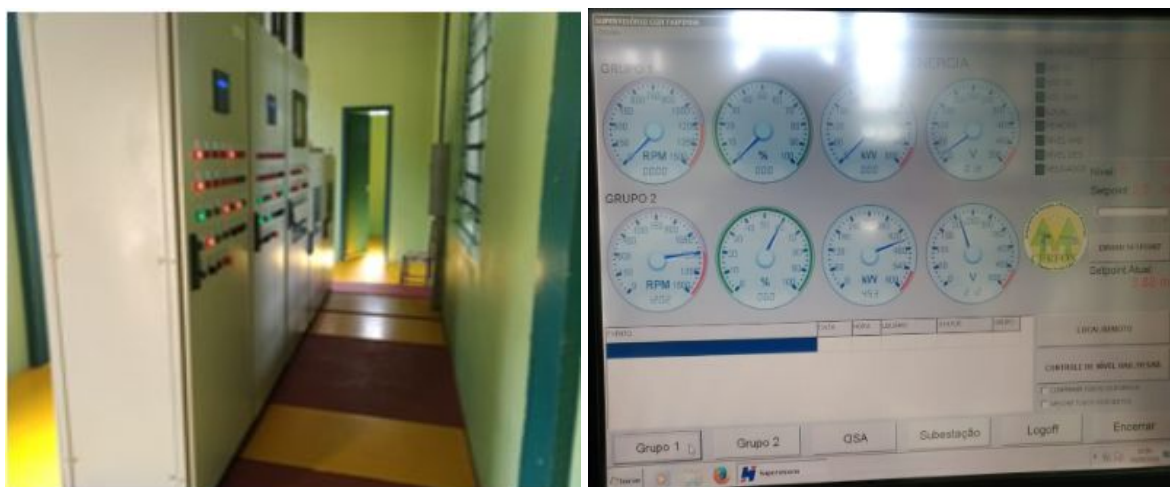
Figura 42 - Turbina Francis



Figura: Autor (2019).

4.2.2 Painele de controle e automação

Figura 43- Painele de automação Usina



Fonte: Autor (2019).

4.2.3 Canal de fuga

Logo após a casa de máquinas inicia o canal de fuga, que tem a função de restituir ao rio a água turbinada. Tem uma extensão de aproximadamente 23m, desde a saída das turbinas até a margem do rio. Foi escavado grande parte em rocha, em direção tangencial ao rio, de modo a permitir uma devolução mais adequada da água turbinada ao seu leito normal. Devido ao modo construtivo da tubulação de sucção da turbina, cuja saída se dá em posição inclinada em direção à saída, o trecho sob a casa de máquinas tornou-se reduzido. Além disso, permite a

saída d'água já no sentido jusante e com uma certa velocidade, diminuindo perdas hidráulicas. Canal de fuga possuem revestimento nas paredes com uma pequena camada de concreto. A casa de máquinas foi construída com concreto armado, com paredes de alvenaria, a qual estão para proteger e absorver os esforços solicitantes dos equipamentos, e ações do tempo.

4.2.4 Subestação -Transformador de tensão

Estes têm a função de transformar a tensão e a corrente vinda do gerador, e distribuí-las de modo que essa energia possa ser consumida de modo seguro. É utilizado um transformador elevador, para o grupo gerador, de acordo com as seguintes características: Potência 1.000 kVA com tensão primária 380 V, tensão secundária 23.000 V, ligação primária triângulo, ligação secundária estrela aterrado frequência, 60 Hz resfriamento, natural, c/ óleo mineral.

Figura 44 – Transformador /Elevador



Fonte: Documentos interno Cerfox (2010).

4.3 Levantamento das informações de geração de energia

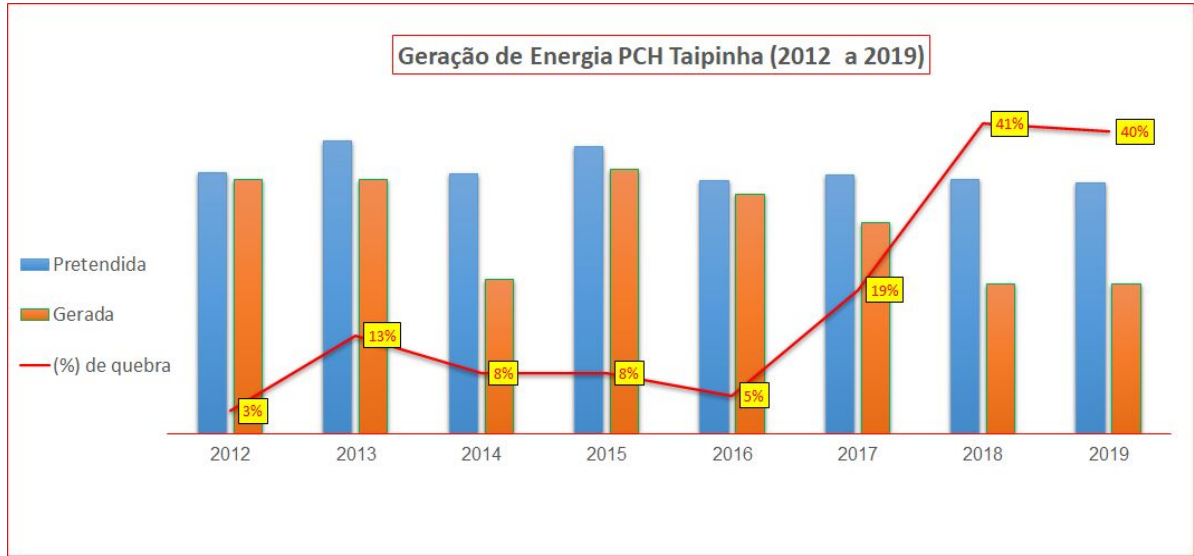
Para levantamento das informações de geração de energia utilizou-se dos relatórios de geração da CGH Taipinha, fornecidos pelos responsáveis pelo empreendimento, onde foram levantados os dados mensais de geração, em kWh, entre janeiro de 2012 e dezembro de 2019.

Para esta CGH, de início, estimou-se, uma geração pretendida, levando-se em conta os cálculos de garantia física de suprimento, os fatores hidráulicos para o sistema

individualizado, energia firme, definidas em projeto básico e períodos críticos probabilísticos observados para uma geração média anual.

Denota-se conforme representado no Gráfico 01, que a CGH teve diversas quedas na geração, que foram impactaram negativamente na produtividade da usina, em destaque para o anos de 2017 a 2019 chegando-se a prejuízos estimados em torno de 35% da energia pretendida para o período.

Gráfico 01: Representação da geração de energia dos últimos oito anos



Fonte: Cerfox (2020).

De acordo com os históricos de manutenção, destaca-se importantes, eventos com paradas significativas, que interromperam o processo de geração da CGH, conforme descritos na Tabela 12. Observa-se que há possibilidades dos problemas de manutenção, estar relacionados com as recorrentes paradas na geração de energia elétrica. Para avaliar, tais possibilidades, dimensionou-se o conduto de baixa e alta pressão, chaminé de equilíbrio e os blocos de apoio e ancoragem. Comprando-se o resultado encontrado para a situação existente com a mínima exigida pelos manuais e normas, utilizados neste estudo.

Tabela 12- Eventos significativos para manutenção

Período	Eventos
---------	---------

2012	Substituição das duas válvulas borboletas
2012	Substituição do trecho de 180m de extensão do conduto de baixa pressão
2016	Solda em vazamento do conduto forçado
2016	Reforço em blocos de ancoragem
2017	Substituição das válvulas borboletas motorizada
2017	Soldas nas juntas de dilatação e trecho do conduto de alta pressão
2018	Substituição dos sensores de pressão para as adutoras
2019	Substituição quadro de comando para monitoramento da tomada d'água
2019	Substituição de juntas de dilatação
2019	Reforço bloco de ancoragem

Fonte: Autor (2020)

Durante a operação da CGH Taipinha algumas patologias foram identificadas e que podem ter relação às características hidráulicas do sistema de adução.

Uma das ocorrências recorrentes observadas nas estruturas hidráulicas é o rompimento dos blocos de sustentação e que, segundo relatos dos operadores da PCH, ocorrem desde o segundo ano de operação. Observa-se que foram realizadas algumas manutenções nos blocos de ancoragem, onde foram aplicados alguns reforços estruturais, conforme Figura 45 (a).

As juntas de dilatação apresentam fissuras, onde em diversos pontos como pode ser observado na Figura 45 (b), ocorrem deformações estruturais, chegando a casos mais extremos da ocorrer vazamentos.

A Figura 45 (c) mostra a deformações nas juntas de dilatação, sendo que conforme se podem observar as mesmas não resistiram aos esforços internos produzidos pela água, não atendendo ao objetivo que é justamente absorver os efeitos de pressão produzidos internamente, bem como as próprias variações de temperatura e oscilações de carga e, consequentemente, o golpe de aríete.

As turbinas também têm apresentado alguns problemas mecânicos, como travamento das pás, ruído no eixo do rotor, desbalanceamento do rotor e, ainda, sinais de desgastes nas pás, possivelmente ocasionados pela cavitação na entrada da turbina, conforme visto na Figura 45 (d, e, f, g, h, i).

Denota-se a presença de oxidação significativa na superfície interna da tubulação, onde pode-se constatar que há um desgaste excessivo das paredes dos tubos metálicos, reduzindo-se sua espessura e consequentemente, reduz a sua resistência. Situações estas que

podem estar relacionados, com as paradas de geração, pois o próprio fluxo d'água, faz o trabalho de proteger o conduto da presença íons (contra ferrugem)

Figura 45 – Patologias nos elementos hidráulicos

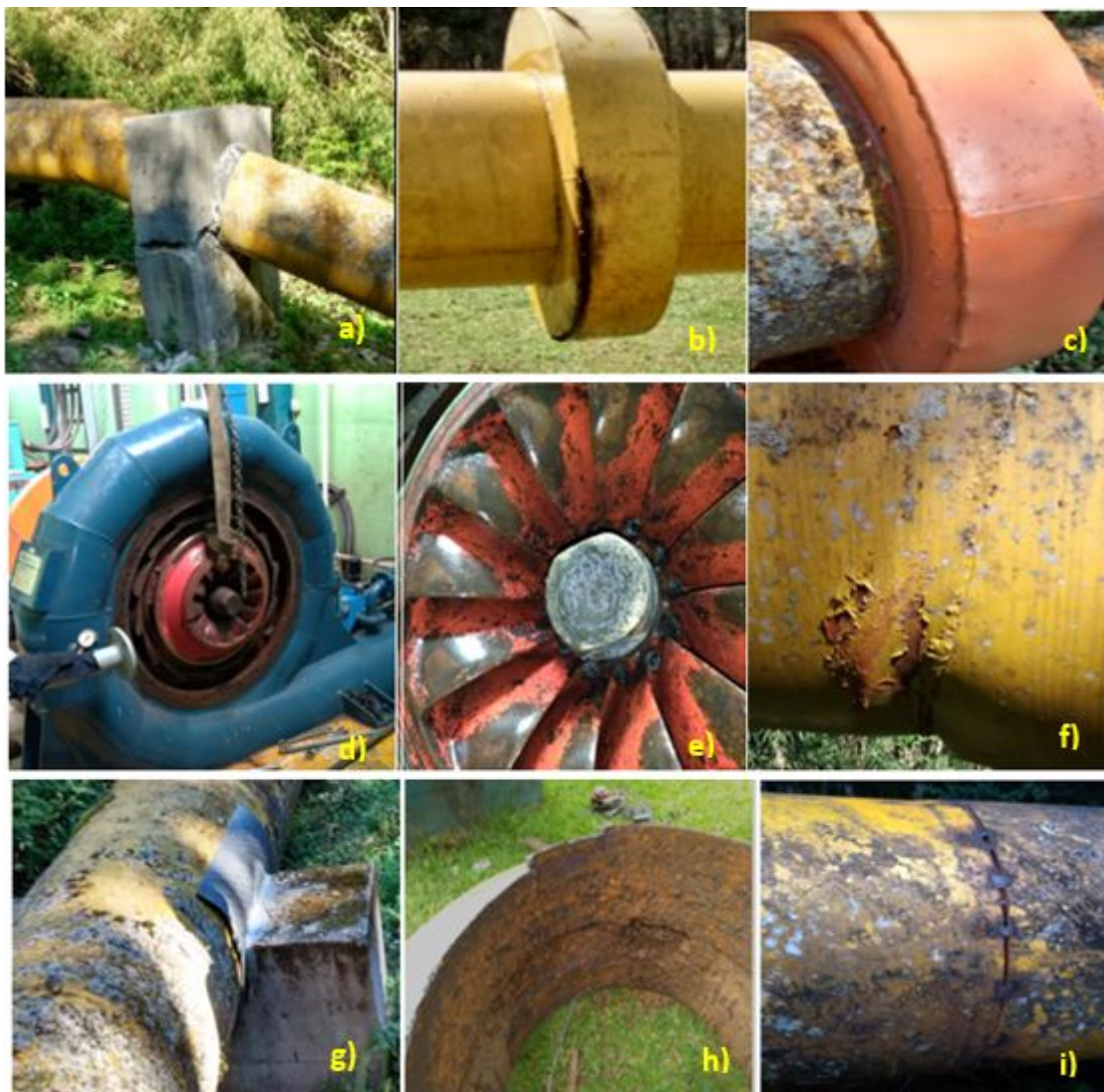


Figura: Autor (2019).

4.4 Dimensionamento

4.4.1 Avaliação e dimensionamento do conduto de baixa de pressão

A avaliação do conduto de baixa pressão, iniciou pelo dimensionamento do diâmetro mínimo para o conduto. O sistema de baixa pressão atualmente instalado na CGH Taipinha, possui um diâmetro uniforme de 0,9 m, com uma declividade de 0,29 m, entre montante da adução e a jusante conectada ao chaminé de equilíbrio.

Para o cálculo do diâmetro mínimo, utilizou-se a Equação 05, considerando a vazão remanescente de $1,24 \text{ m}^3/\text{s}$, coeficiente de atrito (K_s), para o aço de 0,32, comprimento de 450 m do conduto de baixa pressão e uma queda bruta para o sistema de 5,0 m (considerando o nível da soleira do vertedor até o nível final do conduto de baixa pressão), chegando-se a um diâmetro mínimo de 0,736 m para o conduto de baixa pressão. Este diâmetro, atenderia às recomendações mínimas para suprir o fluxo de água para alimentar o sistema de carga da usina. Cabe destacar, que o sistema atual está com um diâmetro de aproximadamente 20% a mais que o mínimo econômico recomendado para dimensionamento. Ainda, a queda bruta atende a recomendação de declividade mínima que é de 0,0004 m/m conforme Eletrobras (2000) e perda total de energia (perda de carga unitária) que não pode ultrapassar 1% da queda bruta ($0,0018 > 0,0004$) (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

Percebe-se que o diâmetro mínimo calculado é menor do que o diâmetro instalado atualmente. Um diâmetro menor para a tubulação, influencia no custo total, porém, a velocidade de escoamento é maior. Um diâmetro menor, para escoamento de fluxo livre, produz menor perda de carga por atrito considerando o perímetro molhada do tubo. A perda de carga durante o escoamento, reduz a capacidade de geração de energia. O conduto de baixa pressão deve garantir o fluxo no conduto forçado, portanto, deve atender as condições mínimas recomendadas, caso não atenda, pode prejudicar o escoamento e o carregamento para o conduto forçado.

As diferenças entre os diâmetros calculado e instalado também interfere na velocidade do escoamento. Com o diâmetro instalado tem-se uma velocidade média de 1,95 m/s calculada pela Equação 04. E para o diâmetro mínimo encontra-se uma velocidade de 2,91 m/s. Ambos atendem ao mínimo de escoamento para manter a vazão de $1,24 \text{ m}^3/\text{s}$, para alimentar as duas turbinas. Com essa diferença de velocidade tem-se uma influência nas perdas de energia, em função da elevação da velocidade, logo, quanto maior a velocidade maior a perda de carga.

O cálculo da espessura mínima para o conduto existente, utilizando a Equação 06, resultou em uma espessura de 4,5 mm, sendo que a tubulação do conduto forçado instalado possui uma espessura de 4,75 mm. Considerando o diâmetro mínimo calculado, a espessura recomendada seria de 4,0 mm. Nota-se que a espessura da tubulação instalada é maior que os valores calculados considerando o diâmetro da tubulação existente e para a tubulação

calculada conforme representado na Tabela 13. Porém, ressalta-se que a Eletrobras (2000) recomenda uma espessura mínima de 6,35 mm para os condutos de baixa pressão. Espessuras maiores garantem uma segurança operacional contra possíveis defeitos de laminação das chapas ou ocorrência de corrosão no interior da tubulação, bem como, favorecem a instalação, transporte e a manutenção. Os cálculos poderão ser visualizados no memorial de cálculos apresentados no **Apêndice A**.

Tabela 13 - Dimensionamento Conduto de Baixa Pressão

Conduto	Mínimo	Existente
Diâmetro do conduto	736 mm	900 mm
Espessura do conduto	4,09 mm	4,75 mm
Velocidade no conduto	2,91 m/s	1,95 m/s
Área da seção do conduto	0,42 m ²	0,63 m ²

Fonte: Autor (2020)

Observa-se que o dimensionamento do sistema de baixa pressão apresenta valores adequados para garantir a carga no conduto forçado. O diâmetro maior do conduto existente garante uma perda de carga menor, o que resulta em maior quantidade de energia entregue ao sistema de geração. Pelo dimensionamento deste sistema, não foi possível identificar qualquer influência destes nas patologias relacionadas durante a geração de energia elétrica.

4.4.2 Dimensionamento do tubo de aeração

Para avaliação do tubo de aeração, utilizou-se inicialmente a Equação 32, para determinar o diâmetro para o tubo de aeração, chegando-se a um valor de 13,37 cm para condição mínima de dimensionamento, e 14,44cm para a situação existente. Para os cálculos do tubo de aeração considerou-se as pressão externas, ou seja, a pressão de colapso (P_c), calculado pela Equação 29, de 0,15 kgf/cm² para condição mínima e 0,11 kgf/cm² para a condição existente.

Avaliando as diferenças nas pressões de colapso, constata-se que a situação existente, não atende a condição mínima para tal pressão externa. Destaca-se, que a espessura mínima

da chapa, definida pela Eletrobras (2000), deverá ser maior que 0,6% do diâmetro interno do conduto, conferindo rigidez suficiente para que não ocorra a deformação da tubulação. Portanto, verifica-se que para atender um melhor custo benefício, utiliza-se o tubo de aeração como opção mais favorável, comparadas com outras alternativa (reforço da tubulação com anéis, o aumento da espessura de toda a tubulação, ou instalação de ventosas). Estes resultados estão relacionados na Tabela 14, e poderão ser visualizados no memorial de cálculos no **Apêndice A**.

Tabela 14 - Dimensionamento tubo de aeração

Conduto	Mínimo	Existente
Diâmetro do conduto	736 mm	900 mm
Pressão de colapso	0,15 kgf/cm ²	0,11 kgf/cm ²
Diâmetro de aeração	13,37 cm	14,44 cm

Fonte: Autor (2020).

4.4.3 Dimensionamento da chaminé de equilíbrio

Inicialmente definiu-se a necessidade de instalação do chaminé de equilíbrio, o qual a Eletrobrás (2000), recomenda a instalação sempre que a relação entre o comprimento e a queda bruta for superior a 5,0. Considerando o comprimento total do conduto de carga de 627,5 m e a queda bruta de 113,5 m, chega-se a uma relação de 5,52 m, indicando a necessidade de instalação da chaminé de equilíbrio conforme Equação 07. Outro critério para instalação ou não da chaminé de equilíbrio, definido pela Eletrobras (2000), é pela avaliação da aceleração no escoamento do conduto forçado (T_h), definido pela Equação 09..

Como o conduto forçado existente é composto por trechos com diferentes diâmetros, encontrou-se uma velocidade média de 2,96 m/s, e para a condição de diâmetro mínimo, velocidade de 3,5 m/s, calculado pela Equação 18. Encontrando-se, respectivamente um tempo de aceleração (T_h) 1,97 s e 1,66 s.

Conforme Eletrobras (2000), a instalação da chaminé de equilíbrio deve ocorrer sempre que o tempo de aceleração for maior do que seis segundos. Para tempo de aceleração menor que 3s ($T_h < 3$ s) não há necessidade de instalação de chaminé de equilíbrio. Diante do resultado dos critérios, para o tempo hidráulico do conduto ser menor que três, leva-se em

consideração o comprimento elevado do trecho do conduto forçado, pois fica em mais de cinco vezes da sua altura de queda bruta. Portanto, considerou-se a necessidade de instalação da chaminé de equilíbrio.

O chaminé atualmente instalado na CGH Taipinha, possui um diâmetro de 3,5 m e uma altura de 10,9 m.

Inicialmente, realizou-se o dimensionamento da área interna mínima da seção transversal da chaminé de equilíbrio (A_{\min}), para os dois casos, mínimo(M) e existente(E), através da fórmula de Thoma (Jakobsson, 2019), utilizado as velocidades médias de escoamento (M) 2,91 e (E) 1,95 com um comprimento (L_{ta}) de 450 m da tubulação adutora, a área da seção transversal do conduto de adução (A_{ta}) (M) 0,43 m² e (E) 0,64 m², a queda bruta mínima (H_{\min}) de 5,0 m, considerando a perda de carga total calculada pela Equação 51 de (M) 0,69 m e (E) 0,52 m. Através da Equação 10, obteve-se a área de seção transversal mínima para o chaminé de equilíbrio de (M) 3,84 m² e (E) 2,48 m², que são as áreas mínimas para garantir a estabilidade das oscilações do nível no interior da chaminé.

Para cálculo da altura da chaminé de equilíbrio (H_c) determinou-se em função da oscilação de elevação (Y_e) e depleção (Y_d) do nível d'água, no interior da chaminé. Utilizando-se a Equação 11, desprezando as perdas de carga no sistema adutor, encontrando-se (M) 2,21 m e (E) 1,78 m para o nível d'água estático mínimo e máximo.

Para depleção consecutiva a elevação (Y_E) máxima da água com um fechamento total (100%) da válvula, encontra-se pela Equação 13, uma altura de (M) 1,82 m, e (E) 3,09 m de elevação da água na chaminé. Para a depleção decorrente da abertura da válvula 50 e 100% (Y_D), obtém-se pela Equação 15, (M) 1,24 m e (E) 2,16 m. Por segurança, adiciona-se 1 m de depleção a partir do nível máximo do reservatório. Conforme, parâmetro de elevação, chega-se em uma altura da chaminé de equilíbrio de (M) 10,06 m e (E) 12,26 m. Portanto, relacionando a seção transversal mínima e a altura, com as dimensões reais existente da usina que tem uma área de 9,62 m² com altura de 10,9 m, entende-se que poderia que a chaminé de equilíbrio instalada está adequada, podendo até possuir dimensões menores, como pode ser visualizado nos resultados do dimensionamento no memorial de cálculo apresentado no Apêndice B.

Tabela 15 - Resultado de cálculos do dimensionamento da chaminé de equilíbrio

Condição Chaminé	Área seção transversal A_c (m ²)	Altura da Chaminé H_c (m ²)	Depleções max Fechamento 100% YE (m)	Depleções parc Abertura 50 -100% YD (m)
Mínima	3,84	10,06	1,82	1,24
Existente	2,48	12,26	3,09	2,16

Fonte: Autor (2020).

4.4.4 Dimensionamento do conduto alta pressão

O sistema de alta pressão atualmente instalado na CGH Taipinha, possui, trechos com diâmetros e espessuras diferentes, conforme demonstrada no item 3.1. Para esta análise comparou-se a situação existente com a mínima ou econômica do conduto forçado conforme mencionado pela Eletrobras (2000).

Através fórmula Bondshu, Equação 17, encontrou-se um diâmetro econômico (D_e) de 0,672 m, considerado como um limite mínimo, entre seu custo e os benefícios energéticos de geração. Para o cálculo do diâmetro, considerou-se uma seção constante ao longo de todo seu comprimento, vazão de projeto (Q) de 1,24m³/s, altura total ($H_t = 1,2.H_b$) de 136,2 m, obtidas em função da sobrepressão relativo ao golpe de ariete. Para este diâmetro encontrou-se uma velocidade média de 3,5 m/s, e para situação existente da CGH, encontra-se uma velocidade de escoamento de 2,7 m/s, encontrada pela média ponderada das velocidades nos diferentes trechos do conduto, definido pela Equação da Continuidade (Equação 18).

Entende-se que com a redução do diâmetro interno do conduto, eleva-se a velocidade de escoamento, bem como, o aumento das perdas de carga no sistema. Determinou-se as as perdas de cargas unitárias (J), devido ao atrito, desprezando-se as demais perdas por singularidades, através da fórmula de Scobey (Equação 19), para uma extensão do conduto forçado de 627,5 m, com diâmetro interno mínimo calculado (D_i) de 0,672 m encontrou-se uma perda de carga por atrito de 8,63 m/m. Esta perda de carga representa 7,06% da queda bruta, ou seja, de perda de energia hidráulica. Já para o conduto existente encontrou-se uma perda de carga 5,06 m a qual representa 4,45% da queda bruta.

Conforme Eletrobras (2000), a máxima velocidade admissível para tubulação de aço, conforme definido na Tabela 9, item 3.6, é de 5 m/s. Estes resultados estão relacionados na Tabela 16. O memorial de cálculo está apresentado no **Apêndice B**

Tabela 16 - Resumo dados conduto forçado

Conduto Forçado	Diâmetro (m)	Comprimento (m)	Velocidade (m/s)	Perda de carga (m)
Mínima	0,672	627,5	3,48	9,17
Existente	0,90	627,5	2,47	5,51

Fonte: Autor (2020).

Observando os resultados de dimensionamento do conduto forçado percebe-se em relação a perda de carga, o sistema existente apresenta desempenho compatível com o recomendado. O que deve-se levar em consideração é que as contrações na tubulação existente, com as reduções concêntricas nos diâmetros, produzem perdas de carga que poderiam ser evitadas. Ainda, a redução acentuada após a bifurcação, anterior a alimentação das turbinas, promove uma velocidade elevada nesta tubulação, bem como uma perda localizada (na própria bifurcação) elevada, causando queda de pressão na alimentação da turbina, prejudicando o desempenho e promovendo condições para ocorrência de cavitação nas pás da turbina, e na própria tubulação, devido a oscilações durante as operações de abertura e fechamento.

4.4.5 Perdas de Carga

Calculou-se as perdas de carga no sistema de baixa e alta pressão, considerado o conduto existente (E), e o mínimo econômico (M). Para o conduto de baixa pressão entre a tomada d'água e o chaminé de equilíbrio encontrou-se um total de perdas de carga de (M) 0,69 m e (E) 0,53 m. Para as perdas de carga no conduto forçado encontrou-se (M) 9,17 e (E) 5,51 m, resultando, em uma queda líquida (HI), (M) 104,33 e (E) 107,99. Conforme resumo, disponível na Tabela 17 e 18, o qual relaciona as perdas encontradas para cada singularidade com seus respectivos resultados. Estes resultados estão relacionados na Tabela 19. O memorial de cálculo está apresentado no **Apêndice C**.

Tabela 17 - Perdas de carga nas singularidades do conduto de baixa pressão

Singularidade	Mínimo	Existente
Perda de carga inicial na tomada d'água (hi)	0,0433 m	0,0194 m
Perda de carga entrada do conduto (he)	0,003 m	0,003 m
Perda de carga na grade de limpeza (hg)	0,0325 m	0,145 m
Perda de carga nas curvas (deflexão) (hc)	0,143 m	0,064 m
Perda de carga por atrito na tubulação adutora (ha)	0,180 m	0,290 m
Perda de carga total	0,69 m	0,52 m

Fonte: Autor (2020).

Tabela 18 - Perdas de carga nas singularidades do conduto de alta pressão

Singularidade	Mínimo	Existente
Perda de carga inicial na tomada d'água (hi)	0,0623 m	0,0310 m
Perda de carga entrada do conduto (he)	0,143 m	0,071 m
Perda de carga nas curvas (deflexão) (hc)	0,131 m	0,090 m
Perda de carga por atrito na tubulação adutora (ha)	8,630 m	5,060 m
Perda de carga nas reduções (hr)	0,017 m	0,027 m
Perda de carga na bifurcação com 1 unid em operação (hb1)	0,19 m	0,29 m
Perda de carga na bifurcação com 2 unid em operação (hb2)	0,04 m	0,06 m
Perda de carga total	9,17 m	5,51 m

Fonte: Autor (2020).

Tabela 19 - Perdas de carga nas reduções do conduto de alta pressão

Comprimento (L)	Diâmetros reduzido	Perda de Carga
Trecho 340 m	800 - 750 mm	0,0011
Trecho 15 5m	75 - 70 mm	0,0014
Trecho 125 m	70 - 60 mm	0,0027
Trecho 5,5 m	2x60 - 45 mm	0,00231

Fonte: Autor (2020).

Através dos cálculos das perdas de carga, observa-se, como era esperado, que as perdas de carga aumentam com as contrações no diâmetro das tubulações. Porém, uma

tubulação com diâmetro menor, como dimensionado considerando as recomendações da Eletrobrás (2000), apresentam maior perda por atrito. Logo, a utilização de tubulações maiores justifica-se pela menor perda de carga, contribuindo para uma maior entrega de energia aos sistemas de geração.

4.4.6 Variação de Pressão - Golpe de Aríete

Calculou-se o transiente hidráulico, do sistema existente de alta pressão da CGH Taipinha, para os 627,5 m de conduto forçado (L) com queda Bruta (Hb) de 113,5 m e diâmetro interno (Di) e espessura para os trechos de 800 mm, de 4,75 mm, 750 mm, de 6,35 mm, 700 mm, de 7,93 mm, 600 mm, de 7,93 mm, 450 mm, de 7,93 mm. E para o diâmetro mínimo econômico, e espessura mínima conforme bibliografia estudada, com (Di) de 672 mm espessura mínima (e) de 6,35 mm. Para melhor avaliar as condições de subpressão e sobrepressão, foi calculado o transiente hidráulico para 6 e 10 segundos de fechamento do distribuidor (válvula borboleta), para as duas condições mínimas e existentes. Considerado o comprimento (L) de 627,5 m do conduto de carga, que é maior que três vezes a queda bruta ($3.H_b$), então, define-se um tempo de fechamento das turbinas hidráulicas de dez segundos ($t = 10$ s) recomendado pela Eletrobras (2000).

Encontra-se uma variação de pressão pelo Método de Allievi, onde calculou-se inicialmente a celeridade da onda de pressão (V_p), obtendo-se, pela Equação 20, para condição mínima (M) 983,96 m/s e para Existente (E) de 1034,27 m/s. Conforme Tabela 20, onde demonstra-se o resultado do cálculo das pressões positivas e negativas do sistema, comparados pelos dois tempos de operação, chegou-se a (M) 22,5% e (E) 15% da queda bruta para tempo de fechamento de 10 segundos. E para operação com de 6 segundos encontrou-se (M) 39% e 32%.

Denota-se que há um aumento significativo na sobrepressão, relacionado ao tempo de operação, chega-se a aproximadamente 60% a mais dos transiente hidráulico, favorecendo aos efeitos do golpe de ariete. Conforme Eletrobras (2000), o limite máximo de oscilação das pressões é de 35% da queda bruta (Hb), encontrado para situação existente que representa 39,72 m, portanto, apresentou-se maior que este limite. Conforme **Apêndice D**

Evidencia-se que, provavelmente, tais problemas relacionados a patologias no sistema hidráulico de geração da CGH Taipinha, estejam relacionadas com a sobrepressão máxima, devido, estar operando, conforme histórico de geração com tempo de 6 s.

Tabela 20 - Resultado do transiente hidráulico para 10 segundos (Golpe de Ariete)

Transiente Hidráulico 10s	Unidade	Mínimo	Existente
Celeridade onda (Vp)	m/s	983,96	1034,27
Sobrepressão (hs +)	m	25,54	18,00
Subpressão (hs -)	m	-37,46	-31,89
Percentual sobrepressão queda bruta	% (Hb)	22,5%	15%

Tabela 21 - Resultado do transiente hidráulico para 6 segundos (Golpe de Ariete)

Transiente Hidráulico (06s)	Unidade	Mínimo	Existente
Celeridade onda (Vp)	m/s	983,96	1034,27
Sobrepressão (h+)	m	44,27	36,32
Subpressão (h -)	m	-11,35	-11,35
Percentual sobrepressão queda bruta	% (Hb)	39%	32%

Considerando os efeitos de sobrepressão positiva e negativa, encontrou-se uma espessura mínima de 4,9 mm, para parede do conduto forçado, definido pela Equação 24, considerado a pressão total encontrada pela equação Equação 27, definida, após conhecer a pressão hidrostática interna máxima (Pi) condição mínima (M) 12,99 kgf/cm² e para o existente (E) 12,84, kgf/cm², para uma tensão admissível de resistência à tração do tubo de 1400 kgf/cm², com uma constante (Kf) de 0,80, para tubos costurados com solda por fusão elétrica somados com mais 1,0 mm para proteção a corrosão.

A pressão máxima normal para funcionamento do conduto forçado é definida como a soma da pressão hidrostática e a sobrepressão decorrente do golpe de ariete, encontrada através da Equação 27 (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009), observando-se o limite máximo de 20% da queda bruta (0,2.Hb). Portanto neste caso a CGH, utiliza para alívio da pressão externa (colapso), como tubo de aeração, somente a chaminé de equilíbrio, o qual

constata-se que pela distância que está posicionada, não permite aliviar a carga de vácuo produzido internamente no conduto, por falta de fluxo d' água.

Tabela 22 - Pressão no conduto Forçado

Pressão no conduto	Mina	Existente
Pressão interna (hidrostática)	12,99 kgf/cm ²	12,84 kgf/cm ²
Pressão externa (colapso)	0,74 kgf/cm ²	1,4 kgf/cm ²
Pressão Total	38,52 kgf/cm ²	33,27 kgf/cm ²

Fonte: Autor (2020)

4.4.7 Blocos de apoio (selas)

Para dimensionamento dos blocos de apoio no sistema de baixa pressão, levou-se em conta o diâmetro externo mínimo 0,741m, e de 0,9 m para o existente. Calculado as dimensões das selas pela Equação 34, e a distância mínima entre as selas pela Equação 36, encontrado (M) 4,4 m e (E) 5,4 m. Considerou-se um solo com tensão admissível de compressão de 1,5 kgf/cm² para solos normais, peso específico da água (Ya) de (1000 kgf/m³) e peso específico da tubulação (Yt) (7850,1 kgf/m³). Com a Equação 37, definiu-se a carga distribuídas ao longo da tubulação (p) que é de 258 kgf/m. Através da relação destes dados encontrou-se uma distância (L) máxima permitida para os blocos de apoio. Cabe destacar que que os blocos existentes na CGH Taipinha configuram semelhança com o que foi calculado. Na tabela 23 estão demonstrados as dimensões encontradas nos cálculos. O memorial de cálculo está apresentado no **Apêndice E**.

Tabela 23 - Dimensões dos Blocos de Apoio

Blocos de Apoio	Distância entre sela (m)	Altura (m)	Largura (m)	Comprimento (m)
Para diâmetro mínimo	4,44	0,89	1,19	1,26
Para diâmetro existente	5,4	1,08	1,44	1,53

Figura: Autor (2000).

4.4.8 Blocos de Ancoragem

No dimensionamento dos blocos de ancoragem, encontrou-se uma distância máxima entre os eixos dos blocos de ancoragem (L_{af}) de 30 m, considerado 2,0 cm de dilatação (Δa)

permitido pela junta a uma temperatura de 30°C, e coeficiente de dilatação linear do conduto ($\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$ do aço) conforme definição na Equação 37. Definiu-se as dimensões do Bloco que possui ângulo de deflexão (\sphericalangle) 30° e 35°, demonstrados na Tabela 24, considerando os diâmetro da tubulação existente (D) de 0,809 mm, 762 mm, 715,615 mm, calculados pela Equação 54.

Tabela 24 - Dimensões dos Blocos de Ancoragem

Dif. Diâmetros	Distância (L)	Altura (A)	Largura (B)	Comprimento (C)
Trecho 5-6	30 m	1,6 m	2,4 m	3,2 m
Trecho 6-7	30 m	1,5 m	2,25 m	3 m
Trecho 7-8	30 m	1,4 m	2,1 m	2,8 m
Bifurcação	-	1,2 m	1,8 m	2,4 m

Figura: Autor (2000).

Considerando que o sistema de adução da CGH Taipinha tem sete trechos com diferentes ângulos de deflexão, os blocos de ancoragem estão instalados de acordo com as distâncias previstas em projeto e nas mudanças de direção. As dimensões calculadas, bem como, as distâncias máximas, foram comparadas com os valores dos blocos de ancoragem e distâncias encontrados no sistema de adução da CGH Taipinha conforme recomendado pela Eletrobras (2000) e que não pode ultrapassar uma distância máxima de 30 metros, estando as condições de instalações dos blocos de ancoragem adequadas

5 CONCLUSÃO

O que se pretendeu com o presente trabalho foi demonstrar a importância de um satisfatório funcionamento de uma CGH, onde são imprescindíveis que todas as etapas

previstas nos critérios de projeto e execução sejam rigorosamente cumpridas, a fim de evitar possíveis complicações de operação pois, qualquer falha técnica de dimensionamento acarreta grandes prejuízos de geração.

Para concretizar este estudo de caso, foi necessário realizar levantamento a campo, onde extraiu-se dados e características dos elementos hidráulicos, estruturais e topográficos, que foram usados na comparação com os resultados dos cálculos de dimensionamento,

No histórico de operação e geração da CGH Taipinha, constam um elevado número de interrupções, os quais se relacionam com falhas e tempo para manutenção nos elementos do sistema de adução. Tais problemas concentram-se nos condutos de alta e baixa pressão, juntas de dilatação, chaminé de equilíbrio, rotor, turbina e nos blocos de ancoragem. Diante disto buscou-se compreender as possíveis causas, através de redimensionamento e análise comparativa das características existentes com as mínimas recomendadas.

Buscou-se compreender as recorrentes interrupções no processo de geração de energia, devido às constantes paradas para manutenção nos componentes da CGH Taipinha, identificando as causas dos excessivos problemas (fissuras nos condutos de carga e nas juntas de dilatação, rompimento das estruturas de sustentação dos condutos, quebra dos elementos das máquinas hidráulicas e oxidação interna dos condutos), durante o tempo de operação da CGH, condições estas que causaram queda significativa na produtividade da usina, e consequentemente, relevantes prejuízos financeiros.

Permitiu-se analisar os fenômenos hidráulicos, relacionando-os, com parâmetros dimensionais, de projeto, que por sua vez encontra-se, nos limites de segurança para dimensionamento. Identificar o transitório hidráulico, que é o caso da cavitação, choque sônico e o golpe de aríete, estes que são danosos aos elementos estruturais. Dados estes demonstrados nos resultados deste trabalho.

Pode-se analisar as paradas que ocasionam as significativas quedas na geração da CGH, relacionando-se com desempenho hidráulico das tubulações, certificando-se da relevante importância de uma avaliação criteriosa nos cálculos de dimensionamento das estruturas, para assim buscar minimizar erros recorrentes em empreendimentos de geração. Falhas em projeto, dimensionamento e execução do sistema hidráulico, acarretam em grandes perdas no sistema de geração de energia, o que prejudica o desempenho e funcionamento para

alimentação das turbinas. Permitindo-se assim, a ocorrência do golpe de ariete, que acaba inutilizando os dispositivos de alívio (chaminé de equilíbrio, juntas de dilatação e tubos de aeração etc.)

O desenvolvimento do trabalho permitiu observar a importância de um correto dimensionamento das estruturas. Permitindo-se, o entendimento do projeto existente comparado com às condições mínimas exigidas por manuais e normas vigentes. Onde permitiu-se relacionar-se às situações de paradas da CGH Taipinha e com isso buscou-se demonstrar uma solução para os problemas encontrados.

Por isso, se faz necessário conhecer e avaliar os parâmetros que caracterizam o empreendimento, para assim, realizar um dimensionamento correto dos elementos, equipamentos, os quais muitas vezes ocorrem por inúmeras equações, que solucionam diversos problemas que possam surgir no dia a dia, o que torna a Engenharia Civil fundamental para o desempenho de diversas áreas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL, **Banco de Informações de Geração- BIG.** Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 05 abr.2019.

_____, **Nota Técnica 0068/2017.** Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2017/037/documento/nota_tecnica_068_2017_srd.pdf> Acesso em: 5 abr. 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10132.** Cálculos de Conduitos Forçados: Rio de Janeiro, ABNT, 1987. 19 p.

_____. **NBR 12296:** Dimensionamento de condutos forçados para pequenas centrais hidrelétricas (PCH): ABNT 1991.

_____, **NBR: 1380.** Dimensionamento de Conduitos Forçados para Pequenas Centrais Hidrelétricas: Rio de Janeiro, ABNT 1991. 6 p.

_____, **NBR 7880:** Grade da Tomada d'água para instalação hidráulica - Terminologia ABNT 2001.

_____, **NBR 7259:** Comportas hidráulica - Terminologia ABNT 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS E CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS- ABRAPCH. **Cenário de PCHs e CGHs no Brasil.** Disponível em: <<https://abrapch.org.br/o-setor/cenario-de-pchs-e-cghs-no-brasil/>>. Acesso em 25 abr. 2020.

ALVES, Gilberto M. **Avaliação da viabilidade de aplicação de uma microcentral hidrelétrica, para atender consumidores localizados em regiões isoladas.** 2007. 156 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2007.

BAPTISTA, Márcio Benedito; COELHO, Márcia Maria Lara Pinto. **Fundamentos de engenharia hidráulica.** 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

BRASIL, Agência Nacional de Águas. **Manual de estudos de disponibilidade hídrica para aproveitamentos hidrelétricos:** manual do usuário / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, SOF, 2010. 71 p. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/todos-os-documentos-do-portal/documentos/re/coreg/manualdedrdh2013diretrizesparaestudoprognosticodequalidadedaagua.pdf>> Acesso em: 14 abril.2019

_____, **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas** / Ministério de Minas e Energia, CEPEL. – Rio de Janeiro : E-papers, 2007. 684p. : il.

_____, Ministério de Minas e Energia – MME- **Balanço Energético Nacional 2018:** Ano base 2017 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2018.

_____, **Santo Antônio Energia, 2019** Disponível em: <http://www.santoantonioenergiaevoce.com.br/index.php/curiosidades-sobre-as-turbinas-bulbo/>. Acesso em: 14 abril. 2019.

_____, **TECHYDRO, A turbina Hidráulica, 2019.** Disponível em: http://www.techydro.com.br/thw_inustrial/turbina-pelton/. Acesso em: 14 abril. 2019.

_____, Terra, 2007- **Consultoria em Engenharia e Meio Ambiente Ltda.** Disponível em: https://www3.opic.gov/environment/eia/santaluzia/rima/RIMA_PCH_Santa_Luzia.pdf. Acesso em: 14 abril. 2019

CHADWICK, A., BOTHWICK, M., MORFETT, J., **Hidráulica para Engenharia Civil e Ambiental.** 5º Ed. Elsilver- Rio de Janeiro, 2017.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. CEMIG . **Marmelos.** Disponível em: https://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/Marmelos.aspx .Acesso em 10 mai. de 2019.

_____.CEMIG. **Usina Hidrelétrica de Marmelos,** Disponível em: https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Usina_Hidrel%C3%A9trica_de_Marmelos , Acesso em: 20 março 2019.

COOPERATIVA DE GERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO FONTOURA XAVIER, **Cerfox. Documentos Internos** (Engenharia Civil, Engenharia Elétrica), 2010.

_____, **Cerfox. Documentos Internos** (Engenharia Civil, Engenharia Elétrica), 2011.

_____, **Cerfox. Documentos Internos** (Engenharia Civil, Engenharia Elétrica), 2019.

_____, **Cerfox. Documentos Internos** (Engenharia Civil, Engenharia Elétrica), 2020.

DIVATIA, E.; CHELVARAJ, A. S.; MURTHY, G. N. **Manual Design Fabrication Erection and Maintenance of Steel Penstocks.** New Delhi: Hydrel Civil Design Directorate - I Central Water Commission. New Delhi, 1974.

ELETROBRAS, **Manual de Micro Centrais Hidrelétricas,** 1985. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>. Acesso em: 03 mar. 2019

_____, **Manuais e Diretrizes para Estudos e Projetos,** 2000. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>. Acesso em: 14 abr. 2020

FARIA Caroline, InfoEscola: **Usina Hidrelétrica,** publicado em Setembro de 2008. Disponível em www.infoescola.com/energia/usina-hidreletrica. Acesso em 10 mai. de 2019.

FERREIRA Thiago Villela Ferreira Jakobsson. **Projeto conceitual do sistema hidráulico de uma Usina Hidrelétrica**. 2019. Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GOOGLE EARTH. Guia do usuário. **CGH Taipinha**. Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-28.94327292,-52.4904165,475.93611965a,4343.86408686d,35y,4.71894145h,0.37652883t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=pt-BR>. Acesso em: 10 maio 2020

HENN, Érico Lopes. **Máquinas de Fluido**, Editora UFSM, Santa Maria, 2001.

HOUGHTALEN, Robert J. AKA. A. Osman, HWANG, Ned H. C. **Engenharia Hidráulica** 4 ed. Pearson Education do Brasil. São Paulo 2012.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 1987.

NETTO, José Martiano de Azevedo, FERNÁNDEZ, Miguel F. y **Manual de hidráulica**. 9º Edição, Blucher, 2015

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS- ONU. **Banco Mundial: 1,2 bilhão de pessoas ainda vivem sem eletricidade**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/banco-mundial-12-bilhao-de-pessoas-ainda-vivem-sem-eletricidade-e-663-milhoes-sem-agua-potavel/>> . Acesso em 08 mar.2020.

ORTIZ, Ramiro Flórez, Pequena Centrais Hidrelétricas, ed.1, São Paulo Editora Oficina de Textos 2014.

PENCHE, Celso. **MANUAL DE PEQUEÑA HIDRÁULICA**. Como llevar a buen fin un proyecto de minicentral hidroeléctrica. 1998.

SCHREIBER, Gerhard Paul. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher; Rio de Janeiro, ENGEVIX, 1977.

SOUZA, Zulcy de. **Centrais hidrelétricas - Dimensionamento de Componentes**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

_____, Zulcy de; SANTOS, Afonso H. M.; BORTONI, Edson da C. **Centrais Hidrelétricas: Implantação e Comissionamento**, ed 3, Rio de Janeiro: Interciência, Ltda 2009.

USINA BAIXO IGUAÇU. **Usinas hidrelétricas “a fio d’água”**. Disponível em: <<http://usinabaixoiguacu.blogspot.com/2014/02/usinas-hidreletricas-fio-dagua.html>> Acesso em: 12 mai. 2019

USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU. **In: Wikipédia:** a enciclopédia livre. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_Hidrel%C3%A9trica_de_Itaipu> Acesso em: 12 out 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A

DIMENSIONAMENTO TUBULAÇÃO DE BAIXA PRESSÃO								
DIÂMETRO MINIMO								
Comprimento		Diâmetro		Espessura	Vazão	Velocidade	P. Colapso	D. Aeração
Trecho	Lcf (m)	De (m)	Di (cm)	e (mm)	Q (m³/s)	V (m/s)	Pc (kgf/cm²)	d (cm)
1-2	60,00	744,51	736,33	4,09	2,00	2,91	0,15	13,37
2-3	76,00	744,51	736,33	4,09	1,24	2,91	0,15	
3-4	96,00	744,51	736,33	4,09	1,24	2,91	0,15	
4-5	218,00	744,51	736,33	4,09	1,24	2,91	0,15	
	450,00							
DIÂMETRO EXISTENTE								
Comprimento		Diâmetro		Espessura	Vazão	Velocidade	P. Colapso	D. Aeração
Trecho	Lcf (m)	De (m)	Di (cm)	e (mm)	Q (m³/s)	V (m/s)	Pc (kgf/cm²)	d (cm)
1-2	60,00	909,00	900,00	4,50	1,24	1,95	0,11	14,44
2-3	76,00	909,00	900,00	4,50	1,24	1,95	0,11	
3-4	96,00	909,00	900,00	4,50	1,24	1,95	0,11	
4-5	218,00	909,00	900,00	4,50	1,24	1,95	0,11	
	450,00							

APÊNDICE B

DIMENSIONAMENTO DO CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO			
Descrição	Dados Disponíveis		
Comprimento do conduto de adução	La	450	m
Queda Bruta	Hb	113,5	m
Queda Bruta Mínima	Hb _{min}	5,00	m
Velocidade no conduto de adução (D _{min})	V _{ami}	2,91	m/s
Velocidade no conduto de adução (D _{ex})	V _{aex}	1,95	m/s
Aceleração da gravidade	g	9,81	m/s ²
Perda de carga no conduto adução (D _{ex})	ht	0,52	m
Perda de carga no conduto adução (D _{min})	ht	0,69	m
Diametro Mínimo econômico	D _{amin}	0,74	m
Área diâmetro mínimo	A _{amin}	0,43	m ²
Diametro Mínimo existente	D _{aex}	0,90	m
Área diâmetro existente	A _{aex}	0,64	m
	Und	Minimo	Existente
Área da seção Transversal da Chaminé	Ac	3,84	2,48
Diâmetro do Chaminé	Dc	2,21	1,78
Elevação do nível d'água estático máximo (Ye)	Ye=Yd	2,25	3,43
Depleção d'água estático mínimo (Yd)			
Peda de carga relativa	k	0,31	0,15
Constante	Ze	0,81	0,90
Depleção consecutiva à elevação máxima, decorrente do fechamento total (100%)	Ye	1,82	3,09
Peda de carga relativa	k	0,31	0,23
Encontrado no Abaco	Zd	0,55	0,63
Depleção decorrente da abertura parcial de 50% a 100%	Yd	1,24	2,16
Depleção máxima do NA do reservatório.	ye	1	1
Elevação de segurança	ye	1	1
Altura Total do Caminé de Equilibrio	He	10,0562	12,26

APÊNDICE C

PERDA DE CARGA CONDUITO DE BAIXA PRESSÃO											
DIAMETRO MINIMO											
Trecho	Comp	Diâmetro		Espessura	Esp. Grade	Dist grade	Incl. grade	Deflexão	Vazão	Velocidade	
Trecho	Lcf (m)	De (m)	Di (m)	e (mm)	e1 (m)	e2 (m)	l(°)	θ(°)	Q (m³/s)	V (m/s)	
1-2	60	0,741	0,736	4,75	0,019	0,1	75°	45	1,24	2,91	
2-3	76	0,741	0,736	4,75				32	1,24	2,91	
3-4	96	0,741	0,736	4,75				15	1,24	2,91	
4-5	218	0,741	0,736	4,75				45	1,24	2,91	
Untaria	Grade 75°		Atrito		Inicial		Curva		Entrada		
J (m/Km)	hg (m)	Kg	ha (m)	Ka	hi (m)	Ki	hc (m)	Kc	he (m)	Ke	
8,85	0,325	1,79	0,18	0,32	0,0433	0,10	0,039	0,090	0,003	0,23	
8,85				0,32			0,039	0,090			
8,85				0,32			0,026	0,060			
8,85				0,32			0,039	0,090			
0,325		0,180		0,0433		0,143		0,003		0,69	
								Total		0,69	
EXISTENTE											
Trecho	Comp	Diâmetro		Espessura	esp. Grade	Dist grade	Incl. grade	Deflexão	Vazão	Velocidade	
Trecho	Lcf (m)	De (m)	Di (m)	e (mm)	e1 (mm)	e2 (mm)	l(°)	θ(°)	Q (m³/s)	V (m/s)	
1-2	60	0,905	0,900	4,75	0,019	0,1	75°	45	1,24	1,95	
2-3	76	0,905	0,900	4,75				32	1,24	1,95	
3-4	96	0,905	0,900	4,75				15	1,24	1,95	
4-5	218	0,905	0,900	4,75				45	1,24	1,95	
Untaria	Grade		Atrito		Inicial		Curva		Entrada		
J (m/Km)	hg (m)	Kg	ha (m)	Ka	hi (m)	Ki	hc (m)	Kc	he (m)	Ke	
3,30	0,145	1,79	0,29	0,32	0,0194	0,10	0,017	0,090	0,003	0,23	
3,30				0,32			0,017	0,090		0,23	
3,30				0,32			0,012	0,060		0,23	
3,30				0,32			0,017	0,090		0,23	
0,145		0,290		0,0194		0,064		0,003		0,52	
								Total		0,52	

APÊNDICE D

DIMENSIONAMENTO TUBULAÇÃO DE ALTA PRESSÃO										
DIÂMETRO MINIMO										
Comprimento		Diâmetro		Espessura		Vazão	Velocidade	Q Líquida	P. Colapso	D. Aeração
Trecho	Lcf (m)	De (m)	Di (cm)	e (mm)	e(mm) h+	Q (m³/s)	V (m/s)	H1 (m)	Pc (kgf/cm²)	d (cm)
5-6	340,00	684,94	672,24	6,35	4,90	1,24	3,50	104,33	0,744	9,96
6-7	155,00	684,94	672,24	6,35	4,90	1,24	3,50			
7-8	125,00	684,94	672,24	6,35	4,90	1,24	3,50			
8.1	5,50	684,94	672,24	6,35	4,90	0,62	3,50			
8.2	5,50	684,94	672,24	6,35	4,90	0,62	3,50			
8.2.1	2,00	684,94	672,24	6,35	4,90	0,62	3,50			
8.2.2	2,00	684,94	672,24	6,35	4,90	0,62	3,50			
	627,50									
DIÂMETRO MINIMO										
Comprimento		Diâmetro		Espessura		Vazão	Velocidade	Q Líquida	P. Colapso	D. Aeração
Trecho	Lcf (m)	De (m)	Di (cm)	e (mm)	e(mm) h+	Q (m³/s)	V (m/s)	H1 (m)	Pc (kgf/cm²)	d (cm)
5-6	340,00	809,50	800,00	4,75	4,57	1,24	2,47	108,20	1,401	9,96
6-7	155,00	762,70	750,00	6,35	4,57	1,24	2,81			
7-8	125,00	715,86	700,00	7,93	4,57	1,24	3,22			
8.1	5,50	615,86	600,00	7,93	4,57	0,62	2,19			
8.2	5,50	615,86	600,00	7,93	4,57	0,62	2,19			
8.2.1	2,00	465,86	450,00	7,93	4,57	0,62	3,90			
8.2.2	2,00	465,86	450,00	7,93	4,57	0,62	3,90			
	627,50		621,43	7,25			2,96			

APÊNDICE C

PERDA DE CARGA CONDUITO DE ALTA PRESSÃO											
DIÂMETRO MÍNIMO											
Trecho	Comp	Diâmetro	Espessura	Deflexão	Vazão	Velocidade	Unitaria	Atrito		Inicial	
Trecho	Lof (m)	Di (cm)	e (mm)	θ (°)	Q (m³/s)	V (m/s)	J (m/Km)	ha (m)	Ka	hi (m)	
5-6	340	0,672	4,09	34	1,24	3,50	13,82	4,70	0,32	0,0623	
6-7	155	0,672	4,09	25	1,24	3,50	13,82	2,14	0,32		
7-8	125	0,672	4,09	35	1,24	3,50	13,82	1,73	0,32		
B-1	5,5	0,672	4,09	60	0,62	1,75	3,70	0,02	0,32		
B-2	5,5	0,672	4,09		0,62	1,75	3,70	0,02	0,32		
B.2.1	2	0,672	4,09		0,62	1,75	3,70	0,01	0,32		
B.2.2	2	0,672	4,09		0,62	1,75	3,70	0,01	0,32		
627,5								8,63		0,0623	
Inicial	Curva		Entrada		Redução		Bifurcação p/ 1-2 und				
Ki	hc (m)	Kc	he (m)	Ke	hr (m)	Kr	hb(m)	Kb	hb(m)	Kb	
0,10	0,037	0,06	0,143	0,23			0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,037	0,06			0,0062	0,01					
	0,056	0,09			0,0062	0,01					
	0,000	0,00			0,0016	0,01	0,04	0,25	0,19	1,20	
					0,0016	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
					0,0016						
0,131		0,143		0,0171		0,04		0,19			
Total										9,17	
EXISTENTE											
Trecho	Comp	Diâmetro	Espessura	Deflexão	Vazão	Velocidade	Unitaria	Atrito		Inicial	
Trecho	Lof (m)	Di (cm)	e (mm)	θ (°)	Q (m³/s)	V (m/s)	J (m/Km)	ha (m)	Ka	hi (m)	
5-6	340	0,800	4,75	34	1,24	2,47	5,88	2,00	0,32	0,0310	
6-7	155	0,750	6,35	25	1,24	2,81	8,07	1,25	0,32		
7-8	125	0,700	7,93	35	1,24	3,22	11,32	1,41	0,32		
B-1	5,5	0,600	7,93	60	0,62	2,19	6,45	0,04	0,32		
B-2	5,5	0,600	7,93		0,62	2,19	6,45	0,04	0,32		
B.2.1	2	0,450	7,93		0,62	3,90	26,43	0,05	0,32		
B.2.2	2	0,450	7,93		0,62	3,90	26,43	0,05	0,32		
627,5								4,84		0,0310	
	Curva		Entrada		Redução		Bifurcação p/ 1-2 und				
Ki	hc (m)	Kc	he (m)	Ke	hr (m)	Kr	hb	Kb	hb	Kb	
0,10	0,019	0,06	0,071	0,23			0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,024	0,06			0,0040	0,01					
	0,048	0,09			0,0053	0,01					
	0,000	0,00			0,0025	0,01	0,06	0,25	0,29	1,20	
					0,0077	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
					0,0077						
0,090		0,071		0,0272		0,06		0,29			
Total										4,87 m	
										5,30	

APÊNDICE D1

TRANSIETE HIDRÁULICO TUBULAÇÃO DE ALTA PRESSÃO										
DIÂMETRO MÍNIMO										
Comprimento		Diâmetro		Espessura		Vazão	Velocidade	Celeridade da onda		
Trecho	Lof (m)	De (m)	Di (cm)	e (mm)	e (mm) h+	Q (m³/s)	V (m/s)	Vp	ρ	θ
5-6	340,00	684,94	672,24	6,35	5,46	1,24	3,50	983,96	1,54	4,70
6-7	155,00	684,94	672,24	6,35	5,46	1,24	3,50	983,96		
7-8	125,00	684,94	672,24	6,35	5,46	1,24	3,50	983,96		
8.1	5,50	684,94	672,24	6,35	5,46	0,62	3,50	983,96		
8.2	5,50	684,94	672,24	6,35	5,46	0,62	3,50	983,96		
8.2.1	2,00	684,94	672,24	6,35	5,46	0,62	3,50	983,96		
8.2.2	2,00	684,94	672,24	6,35	5,46	0,62	3,50	983,96		
	627,50									
Tempo	Constante de linha (gráfico)	Gólpe de aríete		Q.Líquida		P. Hidrostática	P. Total	P. Colapso		
t(s)	ρ/θ	Z+	Z-	hs +	%Hb	h-	Hl	Pi (kgf/cm²)	Pt (kgf/cm²)	Pc > 0,49
6,00	0,33	1,39	0,9	44,27	39,00	-11,35	104,33	14,86	59,12	0,744
DIÂMETRO MÍNIMO										
Comprimento		Diâmetro		Espessura		Vazão	Velocidade	Celeridade da onda		
Trecho	Lof (m)	De (m)	Di (cm)	e (mm)	e (mm) h+	Q (m³/s)	V (m/s)	Vp	ρ	θ
5-6	340,00	684,94	672,24	6,35	5,46	1,24	3,50	983,96	1,54	7,84
6-7	155,00	684,94	672,24	6,35	5,46	1,24	3,50	983,96		
7-8	125,00	684,94	672,24	6,35	5,46	1,24	3,50	983,96		
8.1	5,50	684,94	672,24	6,35	5,46	0,62	3,50	983,96		
8.2	5,50	684,94	672,24	6,35	5,46	0,62	3,50	983,96		
8.2.1	2,00	684,94	672,24	6,35	5,46	0,62	3,50	983,96		
8.2.2	2,00	684,94	672,24	6,35	5,46	0,62	3,50	983,96		
	627,50									
Tempo	Constante de linha (gráfico)	Gólpe de aríete		Q.Líquida		P. Hidrostática	P. Total	P. Colapso		
t(s)	ρ/θ	Z+	Z-	hs +	%Hb	h-	Hl	Pi (kgf/cm²)	Pt (kgf/cm²)	Pc > 0,49
10,00	0,20	1,23	0,67	25,54	22,50	-37,455	104,33	12,99	38,52	0,744

APÊNDICE D2

TRANSIENTE HIDRÁULICO TUBULAÇÃO DE ALTA PRESSÃO										
DIÂMETRO EXISTENTE										
Comprimento		Diâmetro		Espessura		Vazão	Velocidade	Celeridade da onda		
Trecho	Lof (m)	De (m)	Di (cm)	e (mm)	e(mm) h+	Q (m³/s)	V (m/s)	Vp	p	g
5-6	340,00	809,50	800,00	4,75	5,01	1,24	2,47	860,02	1,37	4,94
6-7	155,00	762,70	750,00	6,35	5,01	1,24	2,81	955,48		
7-8	125,00	715,86	700,00	7,93	5,01	1,24	3,22	1029,71		
8.1	5,50	615,86	600,00	7,93	5,01	0,62	2,19	1066,73		
8.2	5,50	615,86	600,00	7,93	5,01	0,62	2,19	1066,73		
8.2.1	2,00	465,86	450,00	7,93	5,01	0,62	3,90	1130,61		
8.2.2	2,00	465,86	450,00	7,93	5,01	0,62	3,90	1130,61		
	627,50		621,43	7,25			2,96	1034,27		
Tempo	Constante de linha	(gráfico)	Gólpe de aríete			Q.Líquida	P. Hidrostática	P. Total	P.Colapso	
t(s)	p/f	Z*	Z-	hs +	%Hb	h-	Hl	Pi (kgf/cm²)	Pt (kgf/cm²)	Pc
6,00	0,28	1,32	0,9	36,32	32,00	-11,35	108,20	14,45	50,77	1,401

DIÂMETRO EXISTENTE										
Comprimento		Diâmetro		Espessura		Vazão	Velocidade	Celeridade da onda		
Trecho	Lof (m)	De (m)	Di (cm)	e (mm)	e(mm) h+	Q (m³/s)	V (m/s)	Vp	p	g
5-6	340,00	809,50	800,00	4,75	5,01	1,24	2,47	860,02	1,37	8,24
6-7	155,00	762,70	750,00	6,35	5,01	1,24	2,81	955,48		
7-8	125,00	715,86	700,00	7,93	5,01	1,24	3,22	1029,71		
8.1	5,50	615,86	600,00	7,93	5,01	0,62	2,19	1066,73		
8.2	5,50	615,86	600,00	7,93	5,01	0,62	2,19	1066,73		
8.2.1	2,00	465,86	450,00	7,93	5,01	0,62	3,90	1130,61		
8.2.2	2,00	465,86	450,00	7,93	5,01	0,62	3,90	1130,61		
	627,50		621,43	7,25			2,96	1034,27		
Tempo	Constante de linha	(gráfico)	Gólpe de aríete			Q.Líquida	P. Hidrostática	P. Total	P.Colapso	
t(s)	p/f	Z*	Z-	hs +	%Hb	h-	Hl	Pi (kgf/cm²)	Pt (kgf/cm²)	Pc
10,00	0,17	1,18	0,719	20,43	18,00	-31,8935	108,20	12,86	33,29	1,401

APÊNDICE E

DADOS DISPONÍVEIS					
Dados disponiveis	Simbolo	valor	unit	und	
Tensão admissível de compressão	σ_c	1,5		Kgf/cm ²	
Peso específico da água	γ_a	1000		Kgf/cm ²	
Peso específico da tubulação	(γ_t)	7850,1		Kgf/m ³	
Dilatação linear da juntas	Δa	20		mm	
Dilatação linear do conduto	α	$1,2 \cdot 10^{-5}$		[°C]	
Variação de Temperatura	Δt	30°		[°C]	
DIMENSIONAMENTO BLOCOS DE APOIO (SELAS)					
Inclinação	Diâmetro	Altura	Largura	Comprimento	Distância
I (°)	De (m)	A (m)	B (m)	C (m)	L (m)
0,4/1000	0,744	0,89	1,19	1,26	4,46
0,4/000	0,684	0,82	1,09	1,16	4,10
0,4/1000	0,909	1,09	1,45	1,55	5,45
DIMENSIONAMENTO BLOCOS DE ANCORRAGEM					
Inclinação	Diâmetro	Altura	Largura	Comprimento	Distância
I (°)	De (m)	A	B	C	L
34°	0,8	1,6	2,4	3,2	30
25°	0,75	1,5	2,25	3	35
35°	0,7	1,4	2,1	2,8	39
60°	0,6	1,2	1,8	2,4	41
Inclinação	Diâmetro	Altura	Largura	Comprimento	Distância
I (°)	De (m)	A	B	C	L
34°	0,736	1,472	2,208	2,944	38
25°	0,736	1,472	2,208	2,944	38
35°	0,736	1,472	2,208	2,944	38
60°	0,736	1,472	2,208	2,944	38